

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Analýza účinnosti procesu tryskání pružinové oceli

Efficiency Analysis Shot Peening of the Spring Steel

Student:

Marek Zajíček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Zajíček**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**
Téma: **Analýza účinnosti procesu tryskání pružinové oceli**
Efficiency Analysis Shot Peening of the Spring Steel
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii procesu tryskání.
2. Charakterizujte použité materiály a technologie.
3. Navrhněte a realizujte způsob analýzy procesu tryskání v tryskací komoře.
4. Proved'te vyhodnocení dosažených výsledků a proved'te diskusi.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
TOTTEN, G.E. (ed.). *Handbook of residual stress and deformation of steel*. ASM international, 2002.
VENGRINOVICH, V., TSUKERMAN, V. Stress and texture measurement using Barkhausen noise and angular scanning of driving magnetic field. In: *Conf. Proceedings of 16th WCNDT 2004 World Conference on NDT, Montreal. 2004*.
OCHODEK, V., RUSZ, S. Residual Stresses Analysis Methodology During Cyclic Plastic Deformation Carbon Steel. *Transactions of the VSB: Technical University of Ostrava*, 2016, pp.43-48.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**


Konzultant diplomové práce: **Ing. Peter Poljak**

Datum zadání: **08.12.2017**

Datum odevzdání: **21.05.2018**


Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

.....

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Marek Zajíček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Nádražní 70, Čelechovice na Hané, 798 16

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ZAJÍČEK, M. *Analýza účinnosti procesu tryskání pružinové oceli: diplomová práce.* Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2018, 58 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá analýzou procesu tryskání stabilizačních tyčí automobilů. V úvodní části práce je vysvětleno k čemu stabilizační tyč slouží, jsou zde popsány použité materiály a výrobní postup součásti, se zaměřením na problematiku tryskání. Dále je zde uvedena teorie o zbytkovém napětí, metodika jeho měření a popis použitých měřicích přístrojů. Experimentální část práce má dvě části. V první části je popsáno měření intenzity tryskání pomocí Almen destiček. Cílem je zde zmapovat intenzitu v různých místech a různých nastaveních. Druhá část se zabývá metodikou měření Barkhausenova šumu na součásti a následnou možností vyhodnocení integrity povrchu. Cílem je zde pak návrh možnosti využití této měřicí metody ve výrobě. Všechny naměřené hodnoty v experimentální části práce jsou graficky zpracovány a vyhodnoceny.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ZAJÍČEK, M. *Efficiency Analysis Shot Peening of the Spring Steel: Master Thesis.* Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2018, 58 p. Thesis head: Ochodek, V.

This master thesis focuses on analyzing the process of shot peening the stabilizer bars used in automobiles. The introductory part of the work explains the purpose of the stabilizer bars. It also examines the materials and the production processes used in manufacturing the component while putting emphasis on the problematics of shot peening. Furthermore, the first part of the work includes the theory of residual stress, the methodology used for measuring residual stress as well as the description of the devices used for measuring it. The experimental section of the work is divided into two parts. The first part describes the measurement of the intensity of shot peening using Almen strips. The goal of this part is to examine the intensity in various places and various settings. The second part focuses on the methodology used for measuring Barkhausen noise on a component and the subsequent possibility to evaluate the integrity of the component's surface. This is carried out in order to suggest possible ways of utilization of this measuring method in the production process. All of the measured values included in the experimental part of the work are compiled graphically and evaluated.

Obsah

Seznam použitého značení.....	3
Úvod.....	4
1. Stabilizační tyč	5
2. Použité materiály	6
2.1 26MnB5 a 34MnB5.....	6
2.2 C67S.....	8
3. Výrobní postup stabilizátoru	9
3.1 Ohýbání.....	10
3.2 Kalení a popouštění.....	10
3.3 Lisování konců	11
4. Tryskání.....	11
4.1 Tryskací médium.....	12
4.2 Způsoby tryskání	13
4.2.1 Injektorové tryskání	14
4.2.2 Tlakové tryskání	15
4.2.3 Tryskání pomocí metacích kol.....	15
4.2.4 Vnitřní tryskání	19
5. Parametry procesu tryskání (kuličkování).....	21
6. Zbytkové napětí	23
6.1 Způsoby analýzy zbytkového napětí	26
6.2 Rentgenová difrakce.....	27
6.3 Barkhausenův šum	27
6.4 Almen testy	29
7. Použité měřicí zařízení	32
7.1 Měřicí přístroj TSP – 3 Almen Gage	32
7.2 Měřicí přístroj MED-2c.....	32
Experimentální část.....	34
8. Almen testy a mapování intenzity v tryskací kabině.....	34
8.1 Shrnutí nastavených parametrů a značení vzorků	38
8.2 Měření Almen testů.....	39
8.3 Vyhodnocení naměřených výsledků	41
9. Možnost využití Barkhausenova šumu pro vyhodnocení povrchu po tryskání.....	43

9.1	První měření	43
9.1.1	Grafické zpracování prvního měření	45
9.2	Druhé měření.....	47
9.2.1	Grafické zpracování druhého měření.....	47
9.3	Třetí měření.....	48
9.3.1	Grafické zpracování třetího měření	49
9.4	Vyhodnocení měření	51
9.4.1	Vyhodnocení prvního měření	51
9.4.2	Vyhodnocení druhého měření.....	53
9.4.3	Vyhodnocení třetího měření	55
9.4.4	Shrnutí vyhodnocení a navržení dalšího postupu	56
	Závěr	57
	Seznam použité literatury	60
	Seznam příloh	62

Seznam použitého značení

Symbol	Význam	Jednotka
$R_{e0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
A	Prodloužení	[%]
26MnB5	Označení materiálu	[-]
34MnB5	Označení materiálu	[-]
C67S	Označení materiálu	[-]
HV10	Tvrdost	[HV]
T	Čas	[s]
V	Označení pozice Vorne - přední	[-]
H	Označení pozice Hinten - zadní	[-]
O	Označení pozice Oben - horní	[-]
M	Označení pozice Mitte - Střední	[-]
U	Označení pozice Unten - Dolní	[-]
NEOT	Označení neotryskaného vzorku	[-]
SOT	Označení špatně otryskaného vzorku	[-]
OT	Označení otryskaného vzorku	[-]
MBN	Jednotka Barkhausenova signálu	[MBN]
X	Značení osy	[-]
Y	Značení osy	[-]
Z	Značení osy	[-]
σ_2	Tlakové napětí	[MPa]
σ_1	Tahové napětí	[MPa]

Úvod

V poslední době je při výrobě automobilových součástí kladen důraz především na ekologičnost a snížení spotřeby automobilu. Z toho důvodu je požadováno co největší redukování váhy jednotlivých komponentů a tím i snížení spotřeby paliva. Pro snížení váhy se komponenty vyrábí v různých konstrukčních provedeních, ale především ze stále tenčích materiálů. Příkladem redukování váhy je použití trubky s menším průměrem, nebo menší tloušťkou stěny. Zároveň ale klademe důraz na dodržení životnosti jednotlivých komponentů a to můžeme docílit pouze za předpokladu, že výrobní proces proběhne správně a za správných podmínek. A právě ověřením správného provedení výrobní operace stabilizačních nápravových tyčí se zabývá i následující práce.

Jednou z operací, která je nedílnou součástí mnoha firem a nepochybně nám zvyšuje životnost a únavové vlastnosti součástí, je tryskání povrchu. Při správném provedení a nastavení parametrů nám tryskání povrchu dokáže zvýšit životnost až desetkrát. Jednou z obecně známých metod, pro vyhodnocení správnosti tryskání jsou takzvané Almen testy. Díky této metodě můžeme určit, zda proces tryskání probíhá správně. Po dokončení operace je nutné potvrdit, že daný povrch dosahuje požadovaných vlastností. Mezi požadované výsledné vlastnosti patří hlavně tvar, který se ale při tryskání moc nemění. Dále jsou požadovány výsledné mechanické vlastnosti, kam patří například zbytkové napětí a mikrostruktura. Jednou z méně známých metod, kterými lze vyhodnotit některé mechanické vlastnosti povrchu je takzvaná metoda měření Barkhausenova šumu.

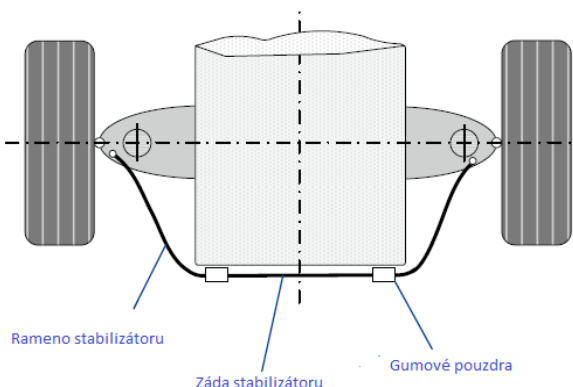
Cílem této práce je vytvoření jakési mapy intenzity procesu tryskání v různých místech a při různých časech, za pomoci již zmiňovaných Almen testů. Toto zmapování intenzity by mělo vést ke správnému nastavení parametrů procesu a všeobecnému přehledu o průběhu tryskání v kabině. Dalším cílem práce je možnost aplikovat metodu měření Barkhausenova šumu na stabilizačních tyčích a díky tomu vyhodnotit správnost provedení procesu tryskání. Veškeré experimenty proběhly ve spolupráci s firmou, která si nepřeje být v práci uvedena. Firma poskytla možnost provést měření pomocí Almen testů na jejich tryskacím zařízení. Zároveň poskytla i vzorky stabilizačních tyčí, na kterých byla ověřena možnost aplikovatelnosti metody měření a vyhodnocení vlastností povrchu pomocí Barkhausenova šumu.

1. Stabilizační tyč

Tak jako se může každé těleso ve volném prostoru volně pohybovat, i automobil má tři posuvné a tři rotační stupně volnosti. Z důvodu bezpečné a pohodlné jízdy je důležité udržet cestující a celý přepravní prostor relativně stabilní. Nerovnosti na vozovce mohou být absorbovány pomocí vhodného zavěšení kol a pomocí nápravových pružin.

Jakmile ale automobil změni přímý směr trasy a zatočí, odstředivé síly, které jsou při zatáčení generovány, způsobí točivý moment, který se snaží převrátit automobil. Kola na vnější straně zatáčky stlačí pružinu, kdežto pružina na vnitřní straně je uvolněna a roztáhne se. Toto chování automobilu a nápravových pružin vede ke zvýšení pohybu kabiny automobilu a tím zhoršuje komfort a pohodlí cestujících.

Z důvodu snížení tohoto naklánění vozidla a pro zlepšení jízdních vlastností při zatáčení byl navrhnut speciální druh pružiny nazývaný stabilizační tyč, nebo stabilizátor. Pokud jede automobil rovně, stabilizační tyč nijak neovlivňuje jízdní vlastnosti. Pokud ale dojde k průjezdu zatáčkou, stabilizační tyč, která je pevně připevněna na nápravu, začne vytvářet točivý moment kolem podélné osy nápravy, čímž napomáhá k vyrovnávání těla automobilu a zabraňuje naklánění při průjezdu zatáčkou. Stabilizační tyče jsou namáhány primárně na krut a ohyb. V poslední době kladou výrobci aut zvýšený důraz na to, aby byly jednotlivé díly automobilu co nejlehčí. Snížením hmotnosti komponentů se sníží váha auta, tím pádem i spotřeba a automobily potom nemají tak velkou zátěž na životní prostředí. Z důvodu snížení váhy stabilizátoru se v poslední době vyrábějí z dutého materiálu (trubek) a upouští se od materiálu plného. Schéma stabilizátoru a jeho základní části můžeme vidět na obr. 1.[8]



Obrázek 1 - Hlavní části stabilizátoru [8]

2. Použité materiály

Jako materiály pro stabilizační tyče používáme různé druhy ocelí. Záleží na tloušťce, tvaru, použití atp. Nejčastěji se používají tvrzené ocele legované bórem. Tyto ocele jsou charakterizovány zejména vysokou tvrdostí po tepelném zpracování a zušlechťování, a tvářitelností při válcování za tepla. Pevnostní charakteristiky dosažené po kalení a temperování jsou podmíněny především díky obsahu bóru, spolu s uhlíkem a manganem. Díky kombinaci tažnosti a tvrdosti se materiál užívá také pro výztuhy a bezpečností prvky v automobilovém průmyslu, součásti podvozků, hřídele převodovek atp. V našem případě je materiál využíván pro výrobu stabilizačních nápravových tyčí. [1, 2]

2.1 26MnB5 a 34MnB5

Tyto ocele patří mezi dva nejčastěji používané materiály pro výrobu stabilizačních tyčí v dané firmě. Po následném tepelném zpracování dosahují materiály vlastností, které jsou u výrobků, jako je stabilizační tyč, nezbytné.

Tabulka 1 - Mechanické vlastnosti materiálu 26Mn B5 [1]

	Podélné [MPa]	Příčné [MPa]
Mez kluzu $R_{e0,2}$	340-540	360-580
Mez pevnosti v tahu R_m	580-740	580-740
	Podélné [%]	Příčné [%]
Celkové prodloužení A1	≥ 10	≥ 8
Celkové prodloužení A2	≥ 15	≥ 14

Kde A1 je prodloužení do nominální tloušťky $e > 3 \text{ mm}$ a A2 je prodloužení do nominální tloušťky $e \geq 3 \text{ mm}$.

Tabulka 2 - Chemické složení materiálu 26MnB5 [1]

	min [%]	max [%]
C	0,23	0,27
Si	0,15	0,35
Mn	1,1	1,4
P	-	0,023
S	-	0,01
Al	-	0,08
N	-	0,01
Cr	0,1	0,25
Ti	0,015	0,045
B	0,0015	0,004

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti materiálu 34MnB5 [2]

	Podélné [MPa]	Příčné [MPa]
Mez kluzu $R_{e0,2}$	320-600	340-610
Mez pevnosti v tahu R_m	580-820	580-820
	Podélné [%]	Příčné [%]
Celkové prodloužení A1	≥ 12	≥ 10
Celkové prodloužení A2	≥ 14	≥ 12

Kde A1 je prodloužení do nominální tloušťky $e > 3 \text{ mm}$ a A2 je prodloužení do nominální tloušťky $e \geq 3 \text{ mm}$.

Tabulka 4 - Chemické složení materiálu 34MnB5 [2]

	min [%]	max [%]
C	0,33	0,37
Si	0,15	0,35
Mn	1,15	1,45
P	-	0,02
S	-	0,01
Al	0,015	0,06
N	-	0,01
Cr	0,05	0,2
Ti	0,015	0,06
B	0,0015	0,0045

2.2 C67S

Jsou to kalené a temperované oceli. Tato skupina ocelí se používá pro součásti vystavované vysokému zatížení. Je zde důležitá kombinace vysoké pevnosti, odolnosti proti opotřebení a houževnatosti. Typickou aplikací těchto ocelí jsou všechny druhy pružin. Dále se používá pro stabilizátory do motocyklů, jako ocel pro nože, nůžky a pily, pro špičky bezpečnostních bot apod. Nejdůležitější je zde tepelné zpracování a jeho správná volba, kterou zaručíme oceli požadované vlastnosti. [3]

Tato ocel se používá pro zkušební vzorky Almen testů. Problematika Almen testů je rozebrána v kapitole 6.4 a 8.

Tabulka 5 - Chemické složení materiálu C67S [3]

	min [%]	max [%]
C	0,65	0,73
Si	0,15	0,35
Mn	0,6	0,9
P	-	0,025
S	-	0,025
Al	-	-
Ni	-	0,4
Cr	-	0,4
Ti	-	-
Mo	-	0,1

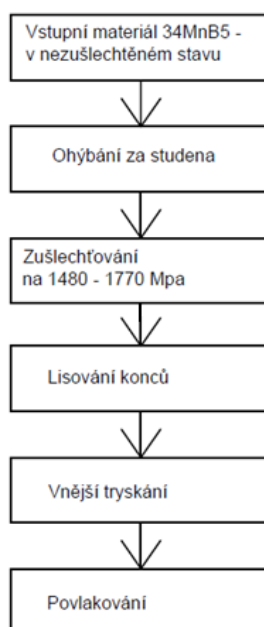
3. Výrobní postup stabilizátoru

Výrobní proces stabilizačních tyčí a jejich materiály jsou voleny na základě použití stabilizátoru, požadované životnosti, rozložení dílů kolem nápravy a výpočtů napětí. Geometrie stabilizační tyče má také velký vliv na napětí a ovlivňují zvolenou technologii výroby. Z těchto důvodů jsou většinou výrobní technologie a materiály voleny individuálně, na jednotlivé projekty.

Pro námi zvolený stabilizátor máme přesně specifikovaný tvar i materiál. Jedná se o běžně používaný typ trubkové stabilizační tyče z materiálu 34MnB5 (obr. 2). Zjednodušený technologický postup výroby je znázorněn na (obr. 3).



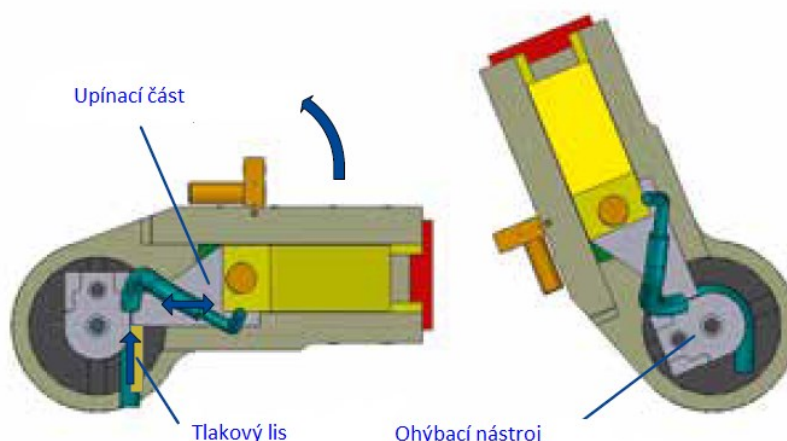
Obrázek 2 - Model stabilizační tyče



Obrázek 3 - Technologický postup operací pro výrobu stabilizátoru

3.1 Ohýbání

Na výrobu stabilizátoru se používá pouze ohýbání za studena. Využívá se zde rotačního ohybu, bez použití ohýbacího trnu. Základní materiál je umístěn mezi ohýbací nástroj a upínací matrici. Rotací dvou ohýbacích nástrojů kolem osy ohybu je materiál ohnut do tvaru ohýbacího nástroje. Kluzná lišta zde pohlcuje boční síly, které vznikají při tváření materiálu, a tím zaručuje, že zůstanou neohýbané části rovné.[8]



Obrázek 4 - Princip rotačního ohýbání [8]

3.2 Kalení a popouštění

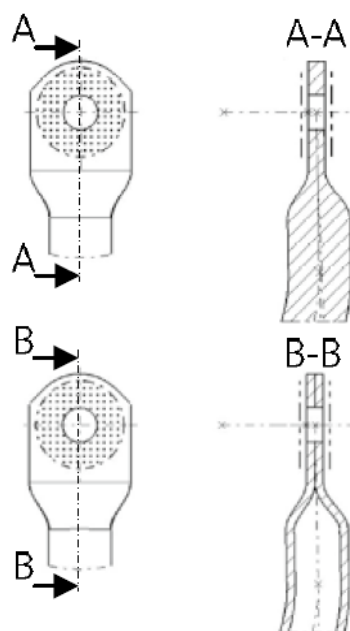
Materiál na daný typ stabilizátoru přichází v nezušlechtěném stavu. Je třeba jej kalit a tím zvýšit jeho mechanické vlastnosti. Nahřívání probíhá v kalících pecích a to ve větších dávkách. Ohřev probíhá ve dvou fázích, kvůli energetické úspoře. Kalicí teplota je stanovena technickými parametry a je odlišná pro různé typy zakázek. Následuje chlazení, jenž probíhá ponorem do kalicí lázně. Následně je nutné odstranit přebytečné zbytkové napětí vzniklé v materiálu po kalení. Materiál popouštíme v popouštěcích pecích. Popouštění probíhá po určitý technologicky stanovený čas. Poté následuje chladnutí na vzduchu.[8]

Tabulka 6 - Mechanické vlastnosti materiálu 34MnB5 po zušlechtění [8]

	[MPa]
Mez kluzu $R_{e0,2}$	1400 ± 100
Mez pevnosti v tahu R_m	1485 - 1775
	[HV10]
Tvrdost HV10	460-540

3.3 Lisování konců

Jedná se o konce stabilizačních tyčí, které slouží k upevnění k nápravě. Běžně se vyrábí ve dvou variantách, kdy nejpoužívanější je první varianta. Zde se konec indukčně nahřeje, slisuje, proděraví a ořízne. Tento typ konce je znázorněn na obr. 5. Tento typ lisovaného konce je vyráběn na speciálních zařízeních, které indukčně ohřejí oba konce stabilizátoru a potom je na jeden zdvih lisu vytvoří. Díky tomu zařízení dosahuje vysoké produktivity. Druhým, méně používaným typem jsou různé druhy svařovaných konců. [8]



Obrázek 5 - Lisované konce stabilizačních tyčí [8]

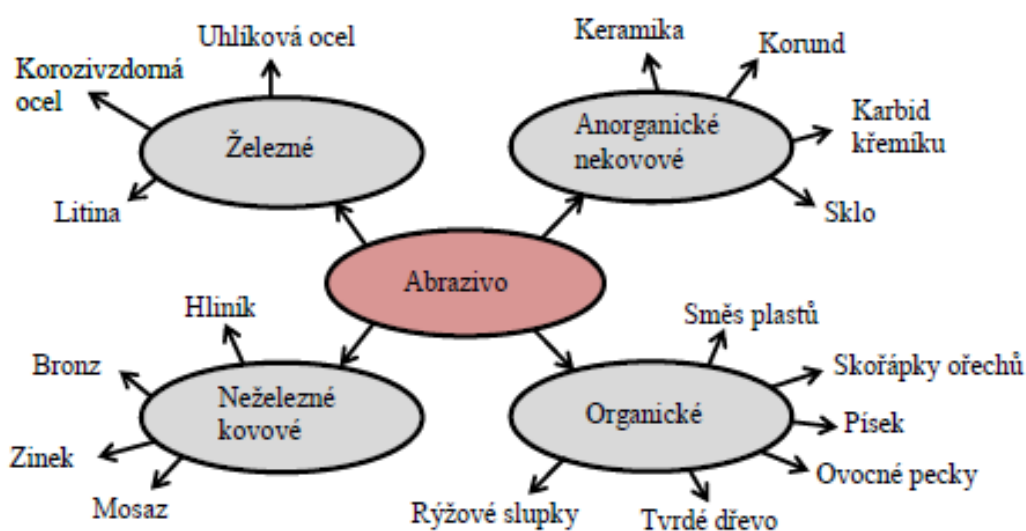
4. Tryskání

Tryskání je technologická operace, která patří mezi mechanické úpravy povrchu. Během procesu tryskání jsou směrem na povrch ošetřované součásti metány částice, také známé jako abrazivum. Abrazivum může být ve formě kuliček z oceli, sekaného drátu, písku, strusky atp. Tryskání jako technologie má různé užití a to především podle použitého tryskacího média. Při volbě abraziva s ostrými hranami se tryskání používá především k očištění povrchu, odstranění rzi, vytvoření vhodného povrchového reliéfu a celkové přípravě povrchu před nanesení ochranného povlaku. V druhém případě, při použití tzv. sférického tryskacího média, kterým jsou nejčastěji ocelové kuličky, se

dociluje hlavně zpevnění povrchové vrstvy, vygenerování vnitřního pnutí, ale zároveň dochází i k čištění a zdrsnění povrchu a tím je vhodnější pro nanesení povrchových vrstev. Vnesením zbytkového napětí do povrchu součásti se zlepšují mechanické vlastnosti a to zejména odolnost proti únavovému porušení. [25, 6]

4.1 Tryskací médium

Existuje velké množství tryskacích médií. Jejich volba závisí na typu zařízení, vlastnostech tryskaného materiálu a hlavně účelu, za kterým tryskání provádíme. Rozdělení tryskacích médií můžeme provádět podle materiálu a podle tvaru. Přehled užívaných tryskacích materiálů můžeme vidět na obr. 6.



Obrázek 6 - Přehled tryskacích materiálů [11]

Tryskací médium z ocele

Patří mezi nejúčinnější a nejpoužívanější materiály pro tryskání. Jedná se o tepelně zpracované, především žíhané, vysokouhlíkové oceli. Využívá se nejčastěji ve formě sekaného drátu, ocelové drtě, nebo granulátu. Sekaný drát se vyrábí ve třech jakostech zakulacení. Toto abrazivum se vyznačuje velkou odolností, dlouhou životností, ovšem i vysokou prašností. Lze použít jak pro čištění, tak pro zpevňování materiálů. [6, 26]

Korozivzdorná ocel

Jedná se o slitinu, která obsahuje chrom, nebo chrom a nikl. Mezi přednosti tohoto materiálu patří jeho životnost s nižší prašností, než u uhlíkové oceli. Tuto ocel můžeme

nalézt pod názvem chronital, nebo grittal, jež se vzájemně liší svým chemickým složením. Používá se nejčastěji jako tryskací materiál na neželezné kovy. [6, 26]

Litina

Většinou vyráběný ve formě granulátu nebo drtě. Díky tvrdosti litiny nedochází k zaoblování hran a tím pádem zůstává zachován abrazivní účinek drtě. Používá se především pro čištění ocelových součástí. [6, 26]

Skleněné kuličky (balotina)

Výhodou je zde stálost a inertní chování vůči tryskanému povrchu. Je ovšem velmi křehká a rychle ztrácí svůj tvar. Z toho důvodu dochází k mnohonásobně větší spotřebě než u ostatních abraziv. Používá se pro tryskání měkkých neželezných kovů jako je hliník a měď. [6,26]

Korund

Korund se používá ve dvou nejznámějších modifikacích a to bílý a hnědý korund. V obou případech jde o velmi tvrdé materiály, používané pro čištění nerezových součástí a litin. Hnědý korund obsahuje na rozdíl od bílého oxid titaničitý. Bílý korund se vyrábí roztavením oxidu hliníčitého, je čistší a na materiálu nezanechává prachové částice. [6,26]

Keramika

Keramika se používá v případech, kdy chceme zachovat dokonalou strukturu povrchu a zamezit deformacím. Keramika je podobně jako sklo dosti křehká, proto má také velkou spotřebu abraziva. Používá se pro zpevnění povrchu u barevných kovů, hliníku a jeho slitin. [6,26]

Písek

Písek se používá při jemném čištění a to pro velké množství různých materiálů. Při použití písku je problém s velkou prašností a ochranou zdraví, při vdechování drobných částic. Např. křemičitý písek bylo již zakázáno používat. [6, 26]

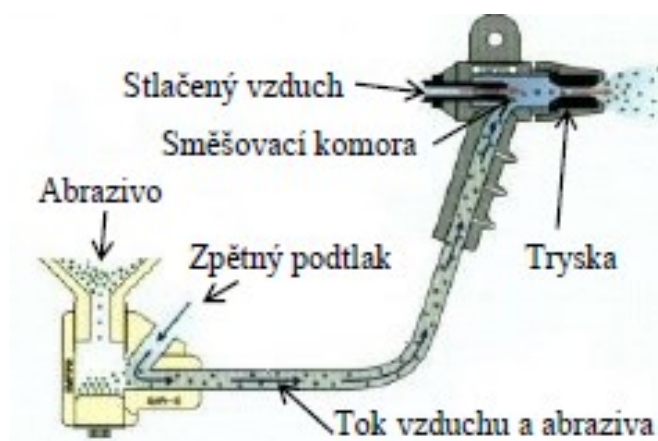
4.2 Způsoby tryskání

Podle způsobu jakým vrháme tryskací médium vůči povrchu, rozdělujeme tryskání do tří základních skupin. Prvním způsob je unášení jemných částic pomocí proudu stlačeného vzduchu, jedná se o tzv. tlakovzdušné tryskání, a to se dále rozděluje na injektorové a tlakové tryskání. Třetí způsob je založen na mechanickém metání abraziva a to pomocí

lopatek v metacích kolech. Zvláštním způsobem tryskání je pak tryskání vnitřních ploch. [25]

4.2.1 Injektorové tryskání

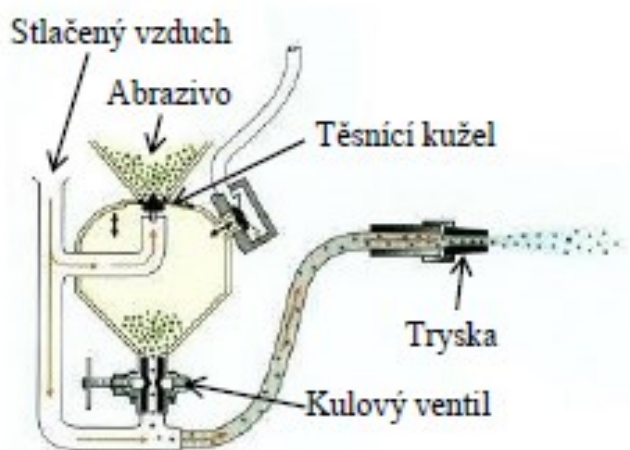
Tento systém využívá energie podtlaku vzduchu. Injektorová pistole je napojena na přívod vzduchu do vzduchové trysky, ve které vzniká podtlak, jenž nasává tryskací médium. Tímto způsobem je v pracovní trysce médium dodávána potřebná rychlost a to poté proudí k ošetřovanému povrchu. Po dopadu média na povrchu se abrazivum odrazí a odpadá na dno kabiny, kde je přisáváno zpět do pistole. Tímto je zajištěn trvalý pracovní cyklus. Injektorové tryskání se dá snadno regulovat, díky dobré regulaci výkonu a možnosti vybrat ze širokého spektra tryskacích médií. Injektorový systém se používá pro pískování skla, otryskávání menších součástí, čištění povrchů, odstranění plastových vtoků, tryskání měkkých materiálů jako je dřevo apod. a používá zejména lehčí typy abraziva jako je balotina nebo písek. [25, 9, 6]



Obrázek 7 - Injektorový systém tryskání [9]

4.2.2 Tlakové tryskání

Systém využívající energii tlaku vzduchu. V případě tohoto způsobu je v systému oběhu abraziva zařazena tlaková nádoba, která je naplněna daným množstvím abraziva. Do nádoby se přivede vzduch, čím se dodá tlak a abrazivum je pak přetlačováno přepouštěcí tryskou přes směšující komoru do gumové hadice. Zde se mísí s tlakovým vzduchem a vystupuje ven pracovní tryskou. Pomocí kulového ventilu se dá regulovat poměr mezi abrazivem z tlakové nádoby a unášecím vzduchem. Po dopadu média na povrchu se abrazivum odrazí a odpadá na dno kabiny, kde je shromažďováno. Po vytryskání obsahu abraziva v tlakové nádobě je třeba proces pozastavit a abrazivum doplnit. Tlakový tryskač dosahuje až třikrát větší intenzity než injektorový, proto se využívá především k čištění kovů, odstraňování barev, okují, rzi a zpevňování povrchové vrstvy. Umožňuje použití lehkého i těžkého tryskacího média jako je například ocel nebo litina. [25, 9, 6]

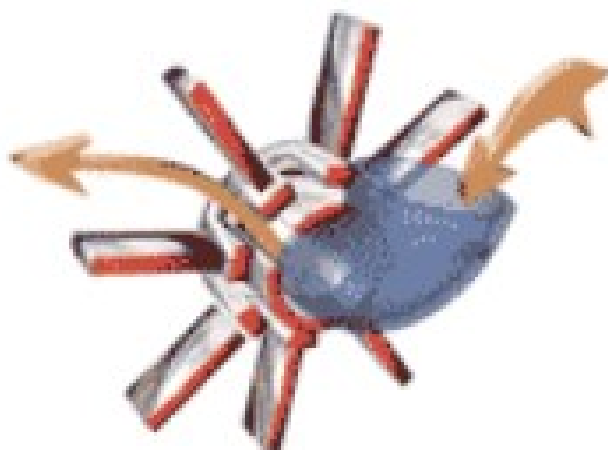


Obrázek 8 - Tlakový systém tryskání [9]

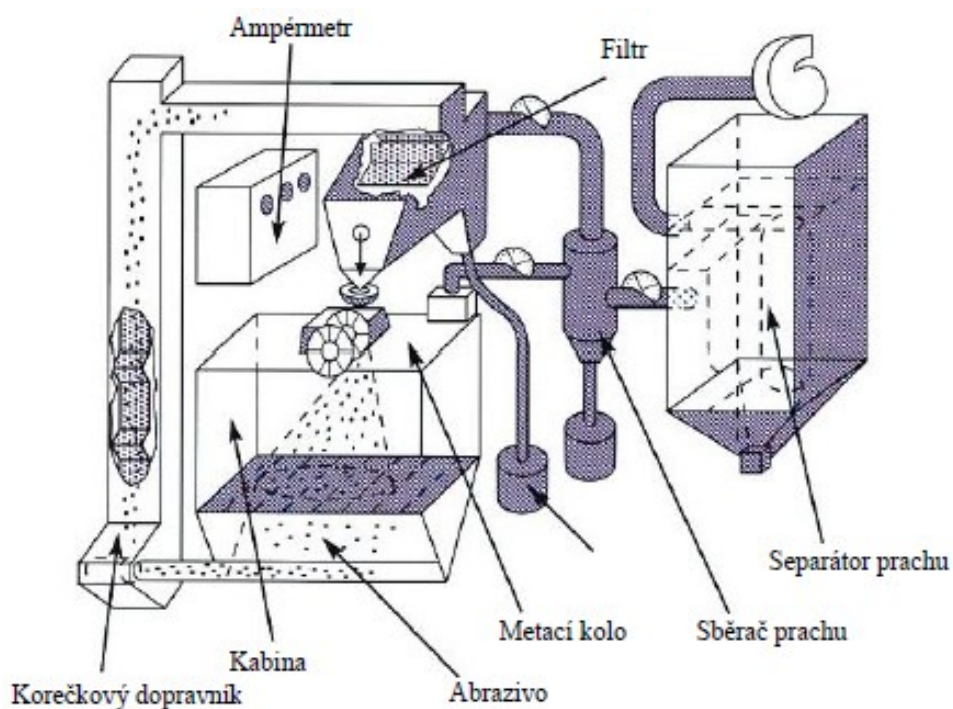
4.2.3 Tryskání pomocí metacích kol

U tohoto typu tryskání je abrazivum urychlováno pomocí obvodové síly, která je vytvářena rotací metacího kola. Metací kolo je opatřeno lopatkami, na které je dodáván tryskací materiál, a ty ho metají proti ošetřovanému materiálu (obr. 9). Metací kola jsou součástí tryskacího zařízení (obr. 10). Tryskací zařízení s metacími koly nachází uplatnění hlavně při tryskání větších součástí s jednoduchou geometrií a většinou v sériové výrobě. Systém metacích kol bývá automatizován, z toho důvodu je také hospodárnější a efektivnější než pneumatické způsoby tryskání. Nejčastěji se zde používá kovové

abrazivum. Pokud se používá abrazivum ve formě kuliček, tryskání se pak označuje spíše jako kuličkování, anglicky pak „shot peening“. [25, 9, 6, 10]



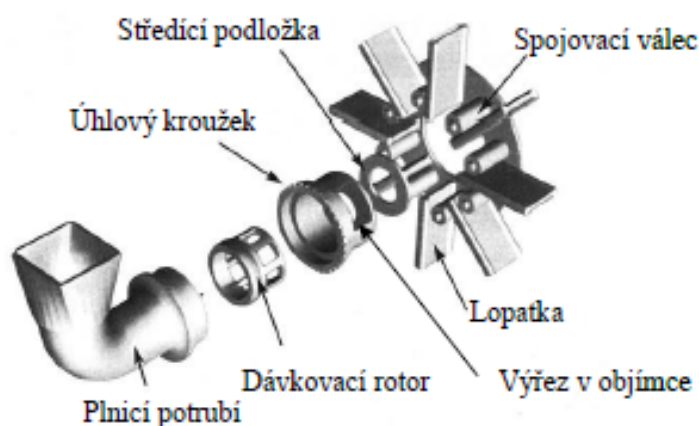
Obrázek 9 - Princip metacího kola [10]



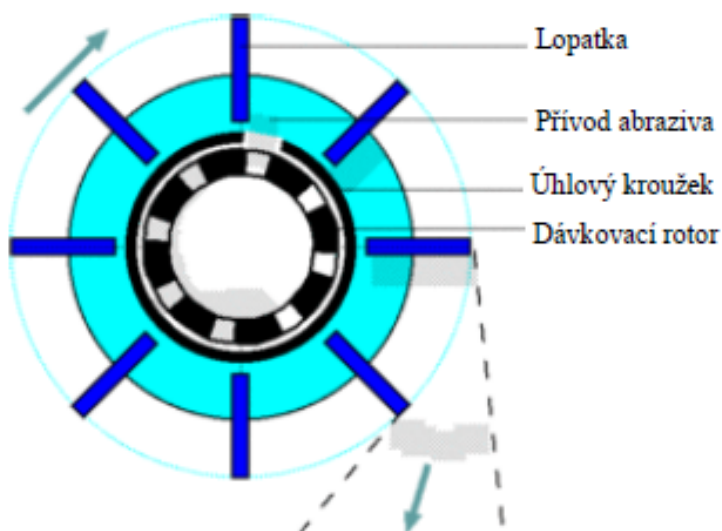
Obrázek 10 - Schéma tryskacího zařízení [12]

Metací kolo je nejdůležitější součástí tryskacího zařízení. Jeho hlavní části jsou znázorněny na obr. 11. Pomocí obvodové síly vytvořené rotací metacích kol je abrazivum metáno proti opracovávanému materiálu. Princip činnosti metacího kola je znázorněn na obr. 12. Abrazivum je průběžně dodáváno do dávkovacího rotoru pomocí plnicího potrubí.

Rotor je opatřen výřezy pro metací materiál. Dávkovací rotor se otáčí souběžně s hlavním rotorem, ve kterém jsou umístěny lopatky. Pomocí odstředivé síly je abrazivum dopraveno drážkami až k úhlovému kroužku. Ten je opatřen výřezy, které vedou tryskací materiál do mezi-lopátkového prostoru. Zde se tryskací médium pohybuje dále po lopatce a je nadále urychlováno až ke konci lopatky, kde lopatku tečně opouští a naráží na otryskávaný díl. [25, 9, 6, 11]



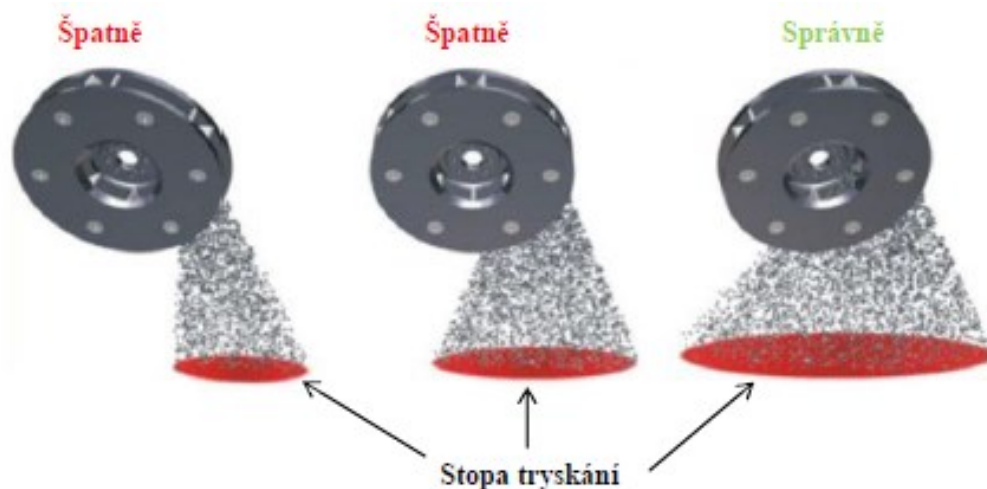
Obrázek 11 - Hlavní části metacího kola



Obrázek 12 - Princip metacího kola [6]

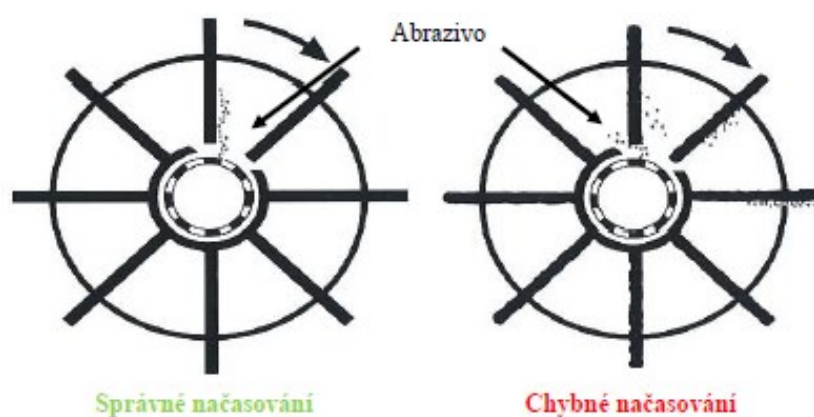
Pomocí úhlu natočení objímky (neboli úhlového kroužku) určujeme, kdy se tryskací materiál dostane mezi lopatky. Obecné pravidlo říká, že čím dříve se se tryskací médium přivede na lopatky, tím dříve mezi-lopátkový prostor opustí. Pokud nastavíme správný

úhel natočení, docílíme tím velkou stopu tryskání (obr. 13). Pomocí nastavení úhlu tryskání se dá korigovat, jak velkou oblast budeme tryskat.



Obrázek 13 - Stopa tryskání podle nastavení úhlového kroužku [6]

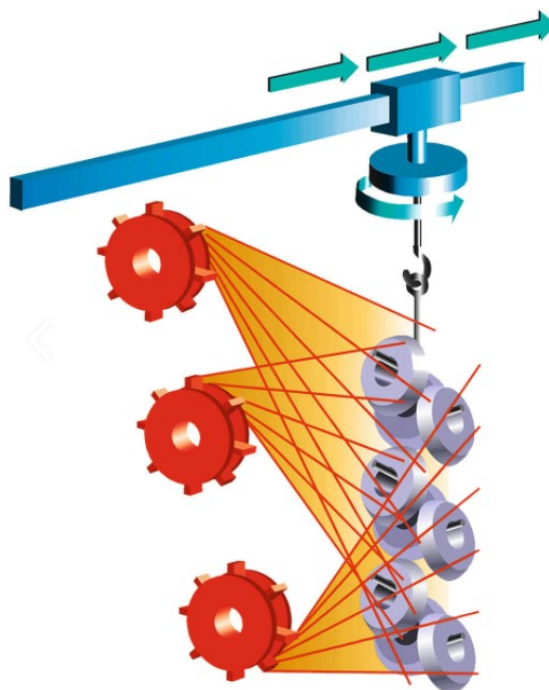
Dalším důležitým faktorem je správné vzájemné seřízení úhlu otevření s otáčkami lopatkového rotoru. Důležité je mít pro každou mezeru mezi lopatkami právě jednu drážku v dávkovacím rotoru. Veškeré abrazivum z dávkovacího prostoru se musí dostat do prostoru mezi dvě lopatky. Tato problematika je znázorněna na obr. 14. Pokud dojde ke špatnému načasování a abrazivum se dostane mezi jiný pár lopatek, dojde k nežádoucímu opotřebení spodní části lopatky, úhlového kroužku, nežádoucím vibracím a tryskání nebude efektivní. [8, 6, 25, 12]



Obrázek 14 - Načasování úhlového kroužku [12]

Celým tímto nastavením musíme docílit co nejlepšího pokrytí tryskaných součástí metaným materiálem. Z toho důvodu jsou většinou součásti umístěny v tryskací kabině

na otočných háčích, ktoré spolu se správným nastavením metacích kol a rotací háku dopomáhajú správne mu provedení procesu tryskání. Celý princip je na obr. 15.



Obrázek 15 - Celý princip tryskání pomocí metacích kol [23]

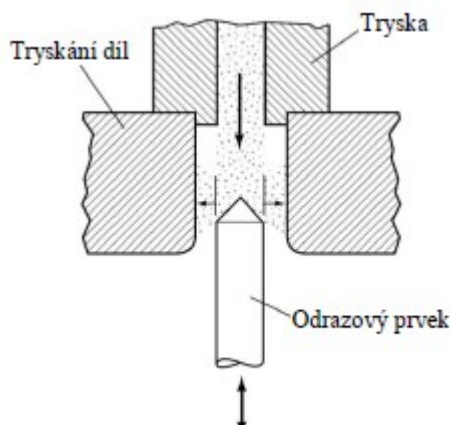
Tryskací materiál je přiváděn do dávkovacího rotoru v metacím kole za pomoci korečkového dopravníku. Po vystřelení abraziva na základní materiál je důležité, aby se dostalo zpět do oběhu a tím se zajistila hospodárnost a automatizace. Aby se médium mohlo znovu použít, je potřeba z něj odstranit nežádoucí nečistoty, prach a regulovat jeho velikost. Tento proces zajišťují filtrační systémy a separační části zařízení. První částí jsou drátěná síta umístěná vespod zařízení. Zde se filtrují nejhrubší nečistoty a velké částice. Pro jemnější filtraci umístíme jemnější drátěný filtr v horní části zařízení, před vstupem do dávkovacího rotoru. Nečistoty jako prach a drobné úlomky jsou odstraňovány pomocí vzduchového separátoru. [4, 25]

4.2.4 Vnitřní tryskání

Vnitřní tryskání je speciální, ne moc rozšířená forma tryskání, používaná pro tryskání vnitřních otvorů, trubek a jiných součástí delších dutých tvarů, u kterých se z vnější strany tryskat nedá.

Provádí se na tryskači, jejichž konstrukce se podobá pneumatickým zařízením, ovšem s tím rozdílem, že tryskáč není zakončen tryskáčím pistolí. Jsou zde dva způsoby

tryskání a to pomocí odrazového prvku a tryskací hlavy. Princip řešení pomocí odrazového prvku vidíme na obr. 16. Tento princip se používá pro průchozí trubky. Na hadici, která přivádí tryskací médium se stlačeným vzduchem je nasazena ocelová tryska. Z druhé strany otryskávaného dílu se do díry zavede odrazový prvek, který má na konci vytvořenou kuželovou plochu, od které se abrazivum odráží na vnitřní stěny a tím dochází k jejich otryskávání. V tomto případě se otáčí otryskávaná trubka. V druhém případě obr. 17 nasadíme na tryskací hadici tryskací hlavu. Tímto způsobem se většinou tryskají tvarově složité duté součásti. Tryskací médium zde přivádíme pomocí hadice, která je chráněna pružinou proti opotřebení, jež by způsobilo tryskací médium. Na konci hadice je speciální tryskací hlava. Díky tvaru hlavy se odráží médium na vnitřní stěny. Při použití této metody se otáčí tryskací hadice, nikoliv obrobek. [25, 4, 8]



Obrázek 16 - Vnitřní tryskání pomocí odrazového prvku [13]



Obrázek 17 - Vnitřní tryskání pomocí tryskací hlavy [6]

5. Parametry procesu tryskání (kuličkování)

Nastavování parametrů tryskací operace je nastavování všech parametrů, které nám mohou ovlivňovat samotné tryskání a hlavně jeho výsledek. Správné nastavení parametrů by mělo vést hlavně k tomu, aby byl proces proveden správně, bylo dosaženo požadovaných vlastností a to za co možná nejnižších nákladů. Je důležité říct, že u procesu tryskání spolu většina parametrů souvisí a jeden parametr ovlivňuje druhý. Před zahájením procesu nastavujeme následující parametry.

Typ tryskacího média

Je prvotním krokem před procesem tryskání. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, médium se volí podle účelu tryskání a také se bere ohled na materiál, který chceme tryskat.

Rychlost metání abraziva

Je jedním z primárních parametrů pro správné provedení procesu tryskání. V případě kuličkování se rychlost mění pomocí otáček metacích kol. Otáčky metacích kol se uvádí v otáčkách za minutu [ot/min] a jejich velikost se pohybuje v tisících a je různá, podle typu zařízení. Pro vytvoření Almen testů v kapitole 8 bylo použito klasické nastavení otáček metacích kol ve firmě a to 2700 ot/min.

Úhel nastavení metacích kol

Je dalším z nastavitelných parametrů procesu. Souvisí s úhlem dopadu abraziva na materiál a nastavuje se pomocí nastavení úhlu metacích kol. Toto nastavení úzce souvisí i s dalšími parametry jako je pokrytí apod. Pro správné nastavení je třeba vzít v potaz počet metacích kol v zařízení, plochu, kterou potřebujeme tryskat, apod. Rozmezí úhlů je různé, pro různé typy zařízení. Konkrétní nastavení úhlu metacích kol je rozebráno v experimentální části práce, v kapitole 8.

Tryskací čas

Je to doba, po kterou dopadá tryskací médium na povrch. Nastavení tohoto parametru je úzce propojeno se všemi předcházejícími. Jeho správné nastavení je nezbytné pro správné docílení požadovaných parametrů po tryskání. Pokud bude čas krátký, je možné, že součást bude nedotryskaná. V opačném případě může dojít k přetryskání. Obě varianty mají negativní vliv na tryskaný povrch.

Po dokončení procesu tryskání kontrolujeme, zda proces proběhl v pořádku. Po procesu tryskání se vyhodnocují tři základní parametry a to je pokrytí, intenzita a zbytkové napětí vnesené procesem tryskání.

Pokrytí

Je vlastně poměr plochy otryskané k celkové ploše dílce. Ve většině případů je požadováno pokrytí 100%. Problematika pokrytí se řeší hlavně v případech, kdy slouží tryskání primárně k odstranění koroze, nečistot z povrchu apod. V případech, kdy tryskáme za účelem zlepšení mechanických vlastností, je čas většinou větší, než pro dosažení 100% pokrytí. Z toho důvodu je pokrytí 100% dosaženo téměř vždy. Je ale potřeba nastavit proces správně, aby bylo docíleno otryskání na celé součásti.

Intenzita

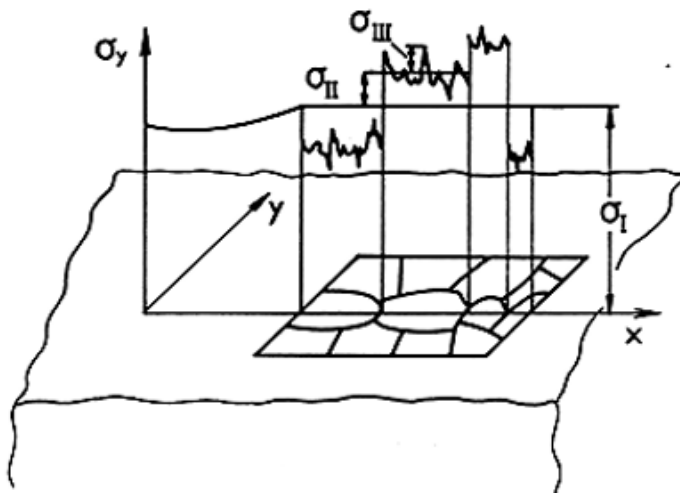
Je veličina, která hodnotí míru zbytkového napětí vneseného do materiálu. Souvisí s rychlostí tryskání, časem i druhem abraziva. Pro přesné stanovení intenzity po tryskání se používají tzv. Almen testy. Problematika Almen testů je v kapitole 6.4. Velikost intenzity se potom udává velikostí Almen oblouku [mm]. Pro intenzitu procesu tryskání se určuje i tzv. saturační bod. Více o problematice saturačního bodu je uvedeno v kapitole 6.4.

Při problematice tryskání se používají pojmy jako nedotryskaný, nebo přetryskaný povrch. V případě nedotryskání materiál nesplňuje požadované mechanické vlastnosti a může docházet k únavovým, nebo korozním trhlinám kvůli absenci zbytkového tlakového napětí. Naopak u povrchu, který je přetryskaný může docházet k tzv. přeložkám a následnému odlupování. Navíc může přetryskání ovlivňovat tvar součásti.

6. Zbytkové napětí

Zbytkové napětí je jedním z primárních cílů operace kuličkování. Zbytkové napětí je napětí, které se nachází v součásti, aniž by byla součást z vnější zatěžovaná. Zbytkové napětí vzniká vždy na základě plastických, nebo elasticko-plastických deformací a můžeme jej rozdělit do tří základních skupin a to na:

- zbytková napětí I. druhu jsou přibližně homogenní ve velké oblasti materiálu,
- zbytková napětí II druhu jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých krystalků,
- zbytková napětí III. druhu jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s mezioatomovými vzdálenostmi.[18]

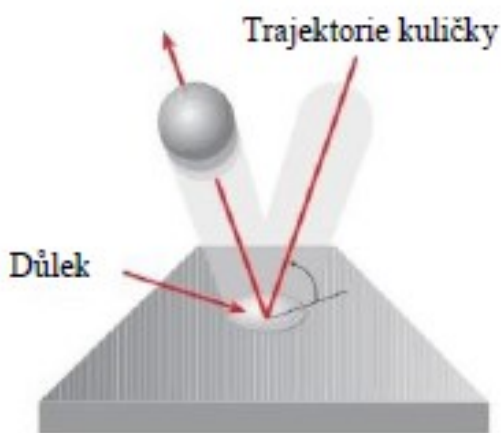


Obrázek 18 - Schématické znázornění zbytkových napětí [18]

Vnitřní napětí může být v součásti buď tahové, nebo tlakové. Při tryskání posíláme proti povrchu abrazivum, které má svou kinetickou energii (obr. 19). Při nárazu na povrch součásti se největší část kinetické energie přemění na teplo, další část kinetické energie zůstane v abrazivu, které se odrazí pryč od povrchu. Poslední část kinetické energie nám vytvoří v materiálu nehomogenní elasticko-plastickou deformaci. Vytvoří se důlek, kdy je materiál nejprve pružně zatlačen, tím vznikne tahové pnutí uvnitř materiálu, jenž se tvoří po celou dobu, po kterou se vytváří důlek. Poté některá vlákna pod povrchem materiálu překročí mez kluzu a vznikne důlek trvalý. Po odrazu abraziva z povrchu se vrátí pružná

deformace zpátky a v okolí vzniká tlakové pnutí, jenž je žadaným výsledkem po tryskání. Princip můžeme vidět na obr. 19 a 20. [18, 19]

Základním předpokladem pro vytvoření vnitřního napětí a celkově pro realizování procesu tryskání je to, že tryskaný materiál musí být stejně tvrdý, ideálně tvrdší, než materiál tryskaný.



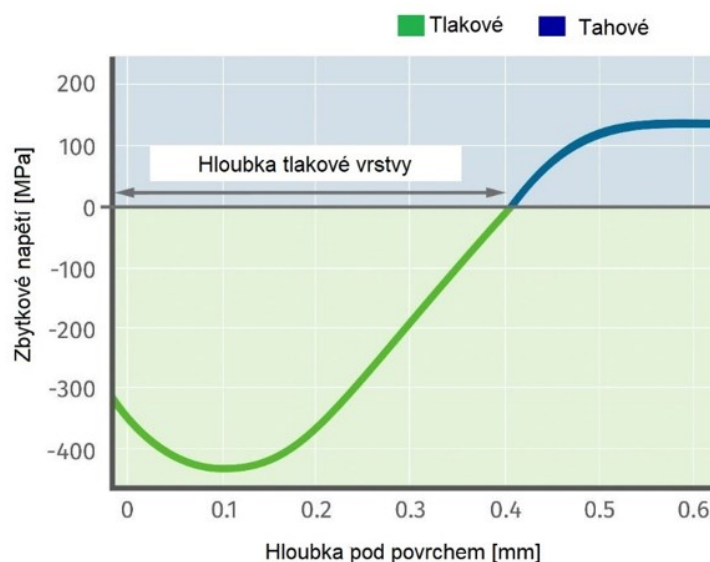
Obrázek 19 - Dopad kuličky na povrch materiálu [14]



Obrázek 20 - Tlakové pnutí [14]

Tlakové vnitřní napětí, které je v materiálu, brání vzniku a zároveň i šíření únavových mikrotrhlin. Tím je docíleno zvýšení únavové životnosti. Ta je zvýšena až desetkrát. Pokud vznikne únavová trhlina, tak má zbytkové napětí tendenci uzavírat její hranice k sobě a tím pádem zamezit jejímu šíření. [4, 18, 19]

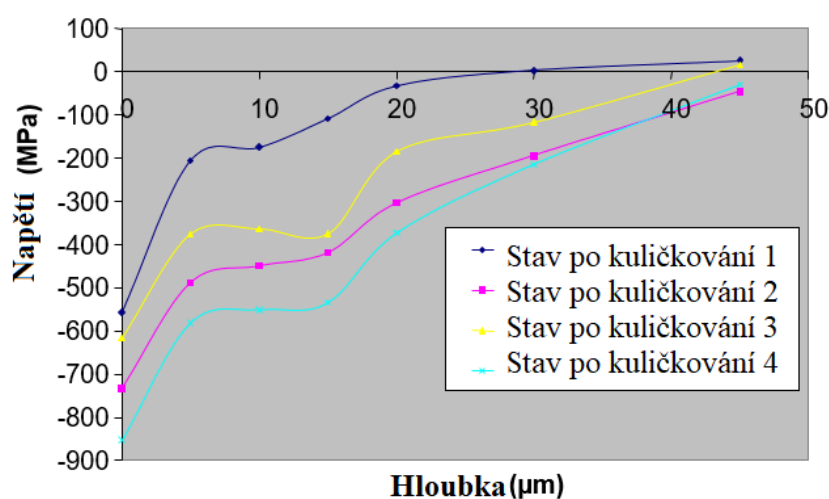
Velikost zbytkového napětí se s hloubkou pod povrchem materiálu mění. Obr. 21 nám znázorňuje tuto závislost.



Obrázek 21 – Typický napěťový profil po kuličkování [27]

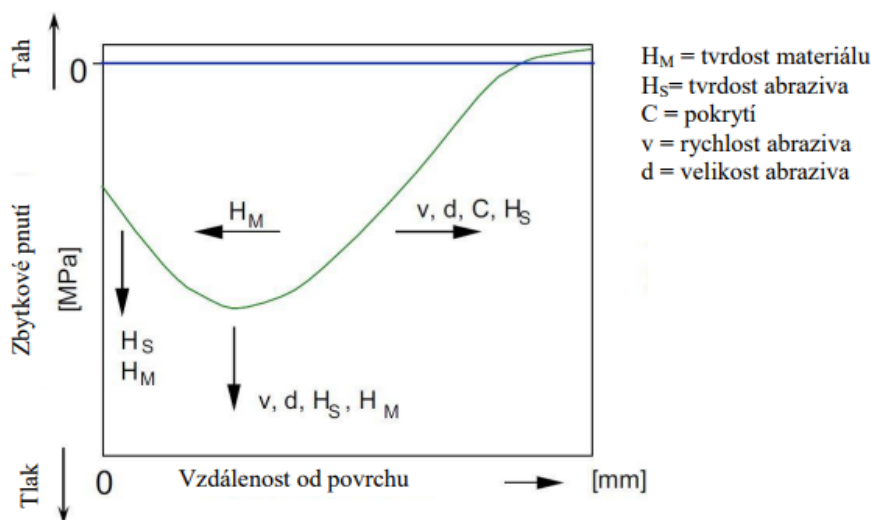
Zbytkové tlakové napětí s rostoucí hloubkou nejdříve roste, až dosáhne svého maxima. Poté klesá a dosáhne nulové hodnoty. Hloubku od povrchu až do místa s nulovým tlakovým pnutím se nazývá hloubka tlakové vrstvy. Hlouběji pod povrchem už se vyskytuje tahové zbytkové napětí. Tato závislost platí pro materiál, který před tryskáním nemá zbytkové napětí, nebo ho má co nejméně.

Pro různé stavy po kuličkování můžeme dosahovat různých napěťových stavů. Několik z nich je vidět na obr. 22, kde jsou znázorněny stavy z konkrétních naměřených hodnot.



Obrázek 22 - Graf závislosti zbytkového napětí na hloubce po kuličkování [14]

Na velikost a průběh zbytkového napětí mají během procesu kuličkování vliv téměř všechny parametry. Na obr. 23 je znázorněna závislost některých parametrů na průběhu vnitřního napětí.



Obrázek 23 - Závislost parametrů tryskání na průběhu vnitřního napětí [15]

6.1 Způsoby analýzy zbytkového napětí

Zbytkové napětí patří mezi veličiny, které je obtížné změřit. Metody, kterými zjišťujeme zbytkové napětí, se dělí do tří základních skupin a to na:

Destruktivní

Metody, při kterých dochází k úplnému zničení, či znehodnocení součásti. Tyto metody jsou založené na měření deformací při odstraňování materiálu. Například měření mikro tvrdosti. Pro odstraňování materiálu se zde používají metody postupného odleptávání, nebo metody kolmých a šikmých řezů. [19]

Polodestruktivní (Semidestruktivní)

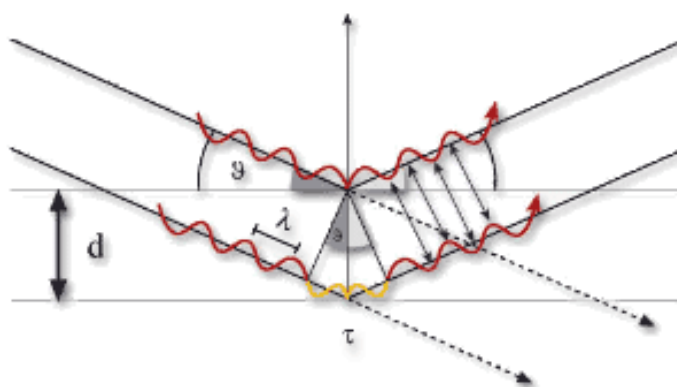
Metody, kdy dochází ke zničení záměrně přidané části povrchu, která se po měření odstraní, nebo poškození neovlivňuje funkci součásti, případně se dá odstranit. Patří sem například vyvrtávací metody, při které využíváme tenzometry a princip uvolňování napětí v materiálu po vyvrtání díry. [19]

Nedestruktivní

Metody kdy měřením nijak nezměníme povrch součásti. Patří sem zkoušky rentgenovým zářením, zářením gama, ultrazvukem, kapilární metody atp. V našem případě bude důležitá metoda rentgenové difrakce a metoda využívající principu Barkhausenova šumu, které budou rozebrány dále. [19]

6.2 Rentgenová difrakce

Rentgenová difrakce, známá také jako difrakční tenzometrie (anglicky pak „X-ray diffraction“), patří mezi nedestruktivní metody vyhodnocování zbytkových napětí v materiálu. Měření probíhá v malých hloubkách a to v řádech setin milimetru. Princip metody je založen na ozařování povrchu pomocí rentgenových paprsků a následného vyhodnocení meziatomové vzdálenosti a mřížkových deformací. Rentgenové paprsky postupně vysíláme na jedno místo na povrchu, pod různými úhly (obr. 24). Pomocí detektoru snímáme odražené paprsky a jejich úhly. Pomocí úhlu odrazu, tzv. Braggova úhlu, relativní meziatomové vzdálenosti a vztahů v teorii plasticity je možné určit velikost zbytkového napětí. Protože se pomocí rentgenové difrakce měří jen v malých hloubkách, povrch se po každém měření postupně odleptává, aby bylo možné měřit zbytkového napětí do větší hloubky. [20]

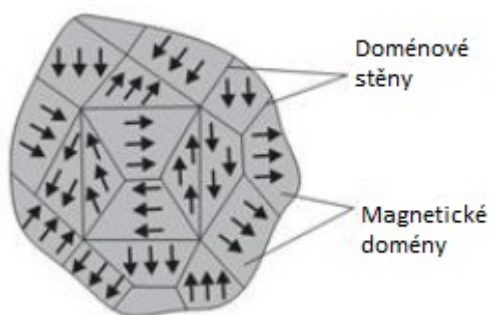


Obrázek 24 - Měření pomocí rentgenové difrakce [22]

6.3 Barkhausenův šum

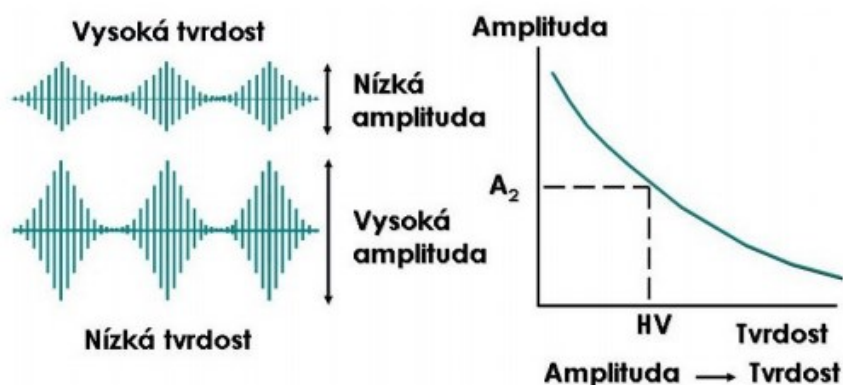
Patří mezi nedestruktivní metody vyhodnocování zbytkových napětí a integrity povrchu. Jev byl objevený profesorem Heinrichem Georgem Barkhausenem v roce 1919. Ten zjistil, že pokud přiblížíme či oddálíme magnet od jádra cívky, v reproduktorech je slyšet praskání. Tento jev funguje jen u feromagnetických materiálů. Feromagnetické

materiály si můžeme představit jako materiály složené z malých oblastí, které jsou podobné tyčovým magnetům. Tyto oblasti se nazývají domény. Každá z domén magnetizuje jinak podle krystalografického směru (obr. 25). Magnetické pole způsobí pohyb doménových stěn, čím způsobí změnu magnetizace vzorku a indukuje elektrický puls v cívce. Signál zachycený měřením není spojitý, ale skládá se z malých skoků (pulsů). Shrnutím všech těchto pulsů nám vznikne signál, který nazýváme Barkhausenův šum. [17, 20]

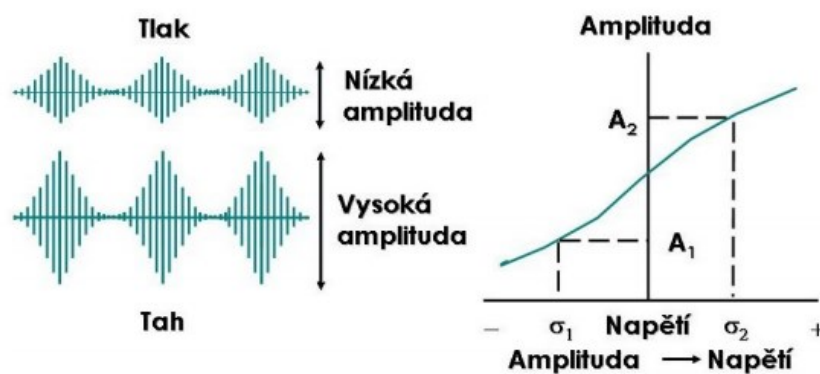


Obrázek 25 - Magnetické domény v materiálu [20]

Další vývoj zjistil, že intenzita signálu souvisí s tvrdostí jádra cívky (měřeného materiálu), kdy s vyšší tvrdostí intenzita klesá (obr. 26). Na intenzitu signálu (neboli velikost amplitudy signálu) má také vliv tlakové a tahové napětí, kde nám tlak snižuje a tah zvyšuje tuto amplitudu (obr. 27).



Obrázek 26 - Vliv napětí na amplitudu signálu [20]



Obrázek 27 - Vliv tvrdosti materiálu na velikost signálu [20]

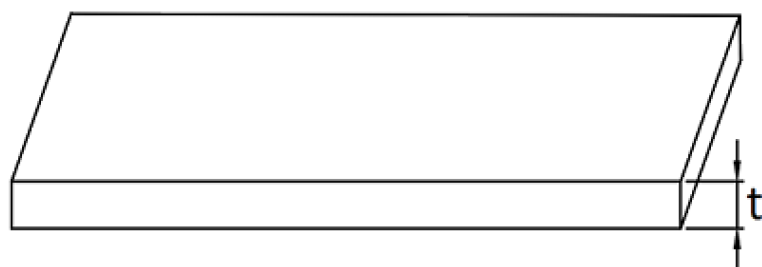
Barkhausenův šum je také tlumen s rostoucí hloubkou. To je způsobeno vířivými proudy uvnitř materiálu, které se indikují při šíření signálu pohybem domén. Tento útlum určuje hloubku, ze které jde informaci získat. Nastavením generovaného signálu se potom určujeme tzv. měřicí hloubka. Ta bývá v rozmezí 0,01 – 1,5 mm. Můžeme tedy měřit těsně pod povrchem, ale i hlouběji. Měřicí hloubka je pak ovlivněna i magnetickou vodivostí materiálu a permeabilitou (to je vliv prostřední na magnetické pole). [17, 20]

6.4 Almen testy

Almen test se primárně používá pro měření intenzity procesu tryskání, popsané v kapitole 5. Test se provádí pomocí destiček (obr. 28), které jsou vyrobeny z pružinové oceli (kapitola 2.2). Tyto destičky se dodávají v několika standardních velikostech a ve třech tloušťkách označených N, A a C (obr. 29).



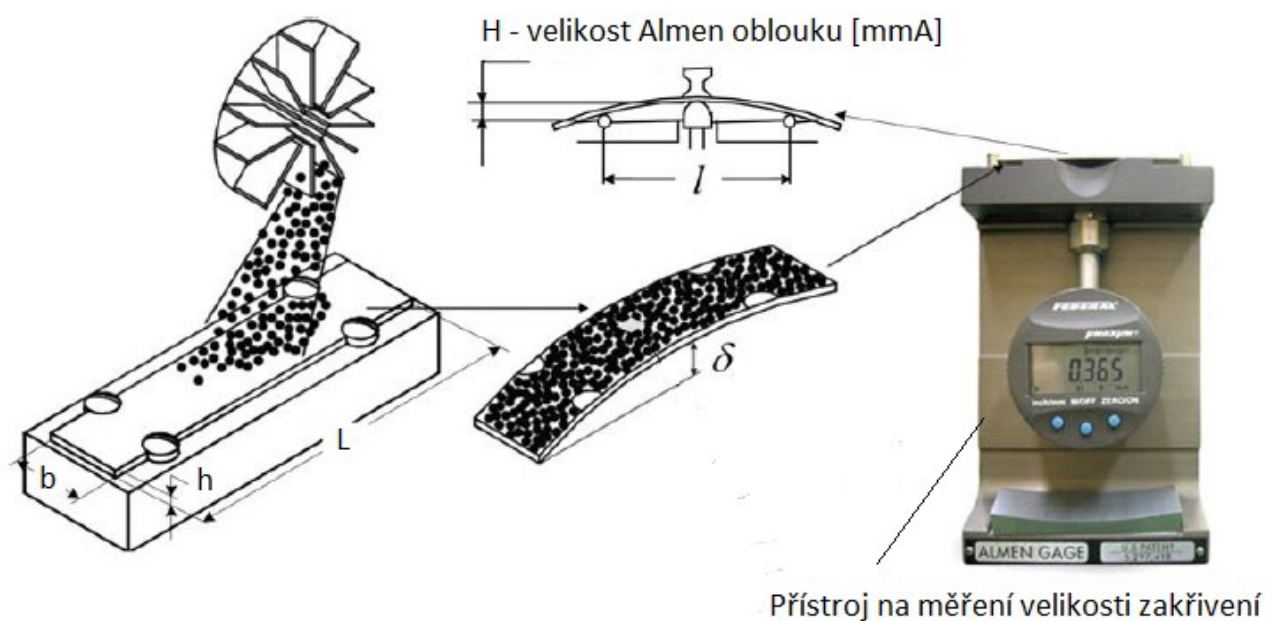
Obrázek 28 - Almen destičky [16]



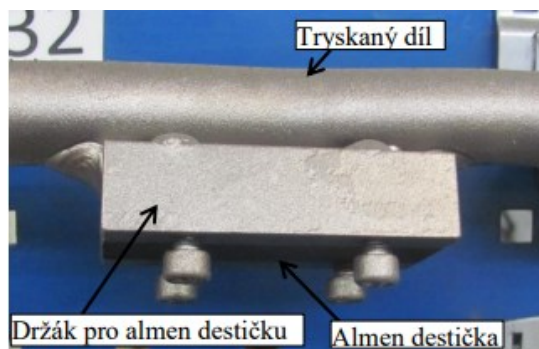
Označení	N	A	C
Tloušťka [mm]	0,79	1,29	2,39

Obrázek 29 - Tloušťky Almen destiček

Princip Almen testu je znázorněn na obr. 30. Destičky se umísťují do tryskací kabiny spolu se součástí a jsou upnuty na speciálním přípravku (obr. 31) tak, že je tryskána jen jedna strana destičky. Upnuta je pevně ve čtyřech místech tak, aby byla zakryta co nejmenší část plochy. Médium naráží do destičky a vyvolává zde tlakové pnutí, které v destičce zanechává zbytkové napětí a ta se prohne. Po uvolnění je destička prohnutá a je měřena velikost prohnutí v mm, tzv. Almen oblouk. Velikost oblouku určuje velikost intenzity tryskání.



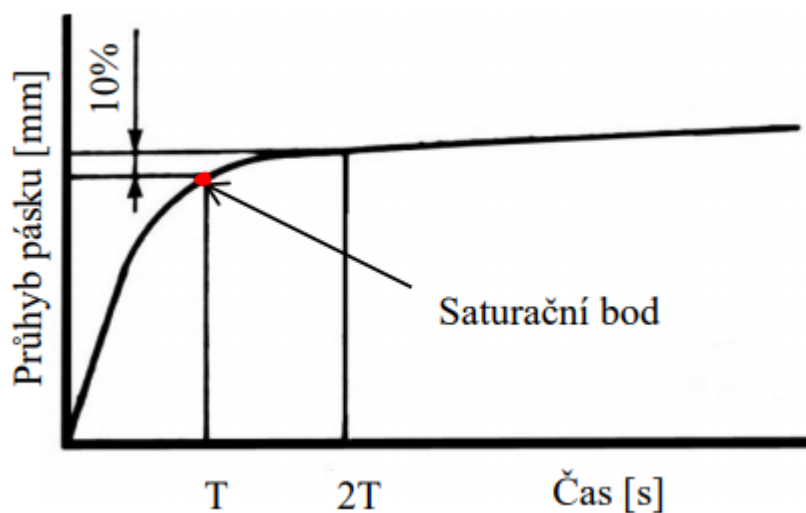
Obrázek 30 - Princip Almen testu [17]



Obrázek 31 - Upnutí Almen destičky na stabilizátoru [6]

Změřenými velikostmi Almen oblouku můžeme ověřit experimentálně stanovené hodnoty intenzity po tryskání, nebo stanovení tzv. saturační křivky a výpočet saturačního bodu.

Saturační bod určíme tak, že tryskáme ve více časech a stejném nastavení zařízení. Pomocí Almen testů se vyhodnocují jednotlivé měření. Jakmile se prohnutí destičky v dvojnásobném čase tryskání nezvětší o více jak 10%, dojde k tzv. nasycení a nalezení saturačního bodu. Princip je znázorněn na obr. 32.



Obrázek 32 - Saturační křivka [6]

7. Použité měřicí zařízení

Pro změření velikosti Almen oblouku a hodnoty Barkhausenova šumu byly použity následující přístroje.

7.1 Měřicí přístroj TSP – 3 Almen Gage

Pro měření velikosti Almen oblouku byl použitý měřicí přístroj americké firmy Electronics Inc., používaný pro danou problematiku. Měřicí přístroj s označením TSP – 3 Almen Gage je zařízení pro měření zakřivení Almen destiček s velkou přesností a opakovatelností výsledků měření. Každé zařízení je vybaveno kalibračním etalonem, díky kterému můžeme kdykoliv provést kalibraci měření. [24]

Digitální měřicí zařízení má přesnost 0,005 mm a měří průhyb v rozsahu 0 – 0,800 mm.



Obrázek 33 - Měřicí zařízení TSP - 3 Almen Gage [24]

7.2 Měřicí přístroj MED-2c

Pro měření Barkhausenova šumu byl použitý měřicí přístroj MEB-2c. Tento přístroj může změřit tři základní hodnoty a to:

- Efektivní úroveň Barkhausenova signálu,
- množství pulsů při Barkhausenově efektu,
- amplitudu signálu řídicího napětí. [28]

U přístroje lze nastavit zesílení úrovně analyzátoru napětí Barkhausenova šumu a úroveň počítání pulsů. Rozdílné měření efektivního napětí umožňuje měřit změnu vlastností

materiálu na principu Barkhausenova šumu. Všechny tři naměřené hodnoty jsou pomocí softwaru zaznamenávány v počítači. [28]

Přístroj se skládá ze dvou základních částí (obr. 34) a to měřicí sonda 1 a samotný měřicí přístroj 2.



Obrázek 34 - Měřicí přístroj MEB-2c

Experimentální část

8. Almen testy a mapování intenzity v tryskací kabině

Almen testy se používají pro zmapování intenzity tryskání v kabině tryskače, jak je vysvětleno v kapitole 6.4. Většinou se připevňují přímo na tryskanou součást, nebo do jejího okolí. Tryskané součásti, v našem případě stabilizační tyče, jsou v tryskací kabině umístěny vertikálně, dokola, na kruhových závěsech (Obr. 35). Závěsy jsou navěšeny na hácích, které jsou v kolejnicích na horní oběžné dráze.



Obrázek 35 - Závěšení stabilizátorů v kabině a dráha háků [23]

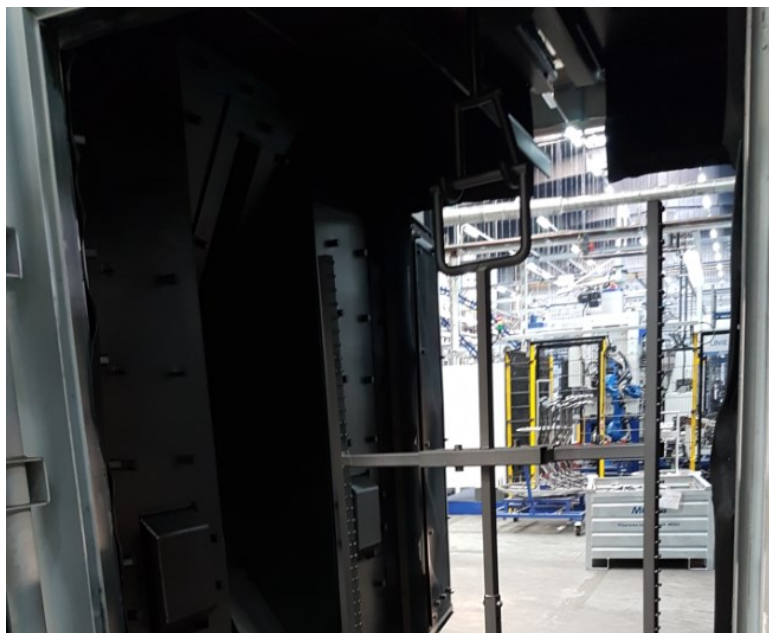
Pro zmapování intenzity tryskání v kabině je nutné umístit Almen testy ve více pozicích, na více místech. Z tohoto důvodu byl firmou sestaven speciální závěs, používaný právě pro Almen testy (obr. 36). Na tomto závěsu je možné umístit testované destičky na jednom rameni na vnitřní a na druhém ramenu na vnější straně, a to do různých výšek. Pro naše měření jsme zvolili umístění do třech pozic na vnější a do třech na vnitřní straně, jak je vidět na obr. 36. Na dalším obr. 37 můžeme vidět bližší pohled na upevnění destiček. Ty jsou upevněny pomocí čtyř šroubů s kulatou imbusovou hlavou. Tyto šrouby by měly destičku pevně držet, přitom ale co nejméně zasahovat na její plochu.



Obrázek 36 - Speciální závěs s připevněnými Almen destičkami v šesti polohách



Obrázek 37 - Detail upevnění destiček



Obrázek 38 - Závěs připravený v tryskací kabině

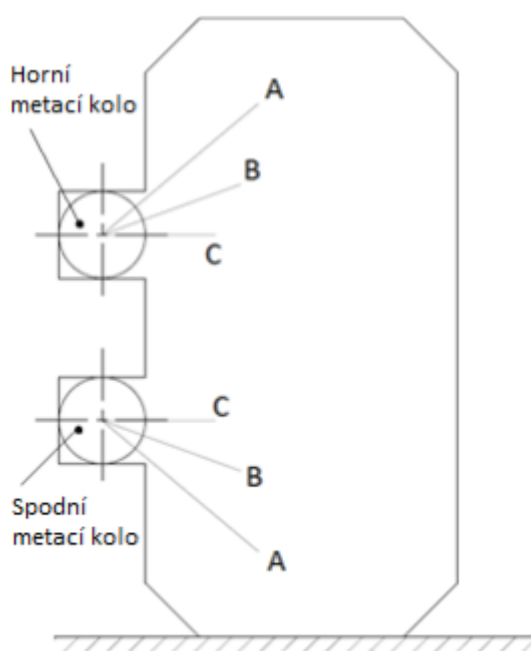
Na tomto závěsu je také možné měnit průměr, tzn. vzdálenost mezi jednotlivými rameny. Toto nastavení umožňuje konstrukce závěsu. Změnu vzdálenosti můžeme vidět na obr. 39. Pro měření intenzity jsme vybrali tři nastavení vzdálenosti mezi rameny a to 500, 785 a 1000 mm. Vzdálenost se měří od plochy, na které jsou umístěny destičky k druhé ploše, přičemž střed vzdálenosti je určen osou prostřední tyče.



Obrázek 39 - Změna průměru závěsu

Další parametr, který byl při výrobě vzorků měněn, je čas, po který byly vzorky tryskány. Pro zjištění saturačních bodů bylo zvoleno nastavení tryskacích časů na 90, 180, 360 a 720 sekund, tedy vždy dvojnásobek. Problematika saturačních bodů je nastíněna v kapitole 6.4.

Poslední parametr, který byl při výrobě vzorků měněn, bylo nastavení úhlů metacích kol. Úhel metacích kol ovlivňuje, pod jakým úhlem a v jakém rozptylu se abrazivum metá proti povrchu, jak už bylo nastíněno v předchozích kapitolách. Schématické nastavení úhlu metacích kol můžeme vidět na obr. 40. V tab. 7 můžeme vidět nastavené hodnoty úhlů. Jejich značení A, B, C pak bude použito u značení vzorků.



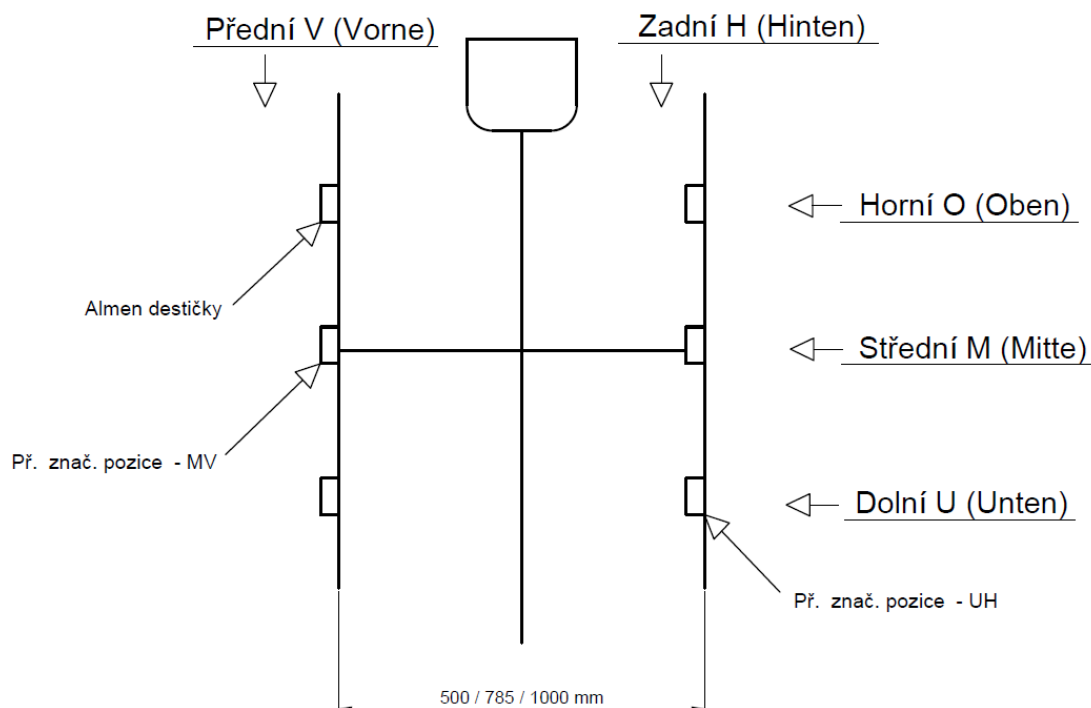
Obrázek 40 - Schématické naznačení úhlů metacích kol

Tabulka 7 - Nastavení úhlů metacích kol

Označ. nastavení	Úhel spodního kola [°]	Úhel horního kola [°]
A	140	220
B	160	200
C	180	180

8.1 Shrnutí nastavených parametrů a značení vzorků

Během vytváření zkušebních vzorků byly měněny parametry uvedené v následující tab. 8. V tabulce je uvedené značení vzorků, které se na destičku zapisovalo ihned po dokončení tryskání. Pro lepší pochopení značení a umístění na závěsu slouží následující obr. 41. Příklad výsledného značení můžeme názorně vidět na obr. 42.



Obrázek 41 - Příklad značení pozic Almen destiček na testovacím závěsu



Obrázek 42 - Příklad značení Almen destičky

Tabulka 8 - Měněné parametry a značení vzorků

Parametr	Hodnota	Značení
Čas tryskání [min]	1,5	1
	3	3
	6	6
	12	12

Průměr závěsu [mm]	500	.1
	785	-
	1000	.2

Pozice	Vnější		
		Nahoře	OV
		Vprostřed	MV
		Dole	UV
	Vnitřní		
		Nahoře	OH
		Vprostřed	MH
		Dole	UH

Nastavení úhlů [°]	Spodní kolo	Horní kolo	
	140	220	A
	160	200	B
	180	180	C

8.2 Měření Almen testů

Po tryskání se do Almen destiček vnese zbytkové napětí, tato problematika byla nastíněna v kapitole 6.4. Po vnesení zbytkového napětí se destička prohne a my měříme velikost tohoto průhybu, takzvanou velikost Almen oblouku.

Před začátkem měření byla provedena kontrolní kalibrace pomocí etalonu. Podle tohoto etalonu bylo zkontrolováno jak měření rovinnosti, tak měřené velikosti oblouku (obr. 43). Hodnota velikosti prohnutí uvedená na etalonu byla 0,605 mm. Velikost kontrolní měření se pohybovala vždy v rozmezí 0,603 – 0,607 mm, z čehož je možné vyvodit dobré seřízení a přesnost měřidla.



Obrázek 43 - Kalibrace měřícího zařízení

Postup měření:

- Přiložení destičku na měřicí přístroj.
- Vyzkoušení správnosti ustavení pomocí pohybů do obou krajních poloh.
- Odečtení první hodnoty prohnutí.
- Opětovná kontrola ustavení.
- Odečtení druhé hodnoty prohnutí.
- Zapsání naměřených hodnot.



Obrázek 44 - Měření velikosti Almen oblouku

0A I.NASTAVENÍ, PRŮMĚR 785 mm, ÚHEL METACÍCH KOL A										
1,5 min		1	2	Průměrná hodnota			1	2	Průměrná hodnota	
	10V I	0,36	0,358	0,359			10H I	0,419	0,417	0,418
	1MV I	0,29	0,288	0,289			1MH I	0,406	0,4	0,403
	1UV I	0,368	0,37	0,369			1UH I	0,415	0,415	0,415
3 min		1	2	Průměrná hodnota			1	2	Průměrná hodnota	
	30V I	0,407	0,406	0,4065			30H I	0,493	0,493	0,493
	3MV I	0,348	0,347	0,3475			3MH I	0,452	0,453	0,4525
	3UV I	0,41	0,408	0,409			3UH I	0,481	0,482	0,4815
6 min		1	2	Průměrná hodnota			1	2	Průměrná hodnota	
	60V I	0,469	0,469	0,469			60H I	0,539	0,539	0,539
	6MV I	0,36	0,359	0,3595			6MH I	0,496	0,493	0,4945
	6UV I	0,449	0,44	0,4445			6UH I	0,526	0,523	0,5245
12 min		1	2	Průměrná hodnota			1	2	Průměrná hodnota	
	120V I	0,483	0,483	0,483			120H I	0,591	0,589	0,59
	12MV I	0,381	0,382	0,3815			12MH I	0,531	0,533	0,532
	12UV I	0,495	0,497	0,496			12UH I	0,569	0,571	0,57

Obrázek 45 - Příklad zápisu naměřených hodnot

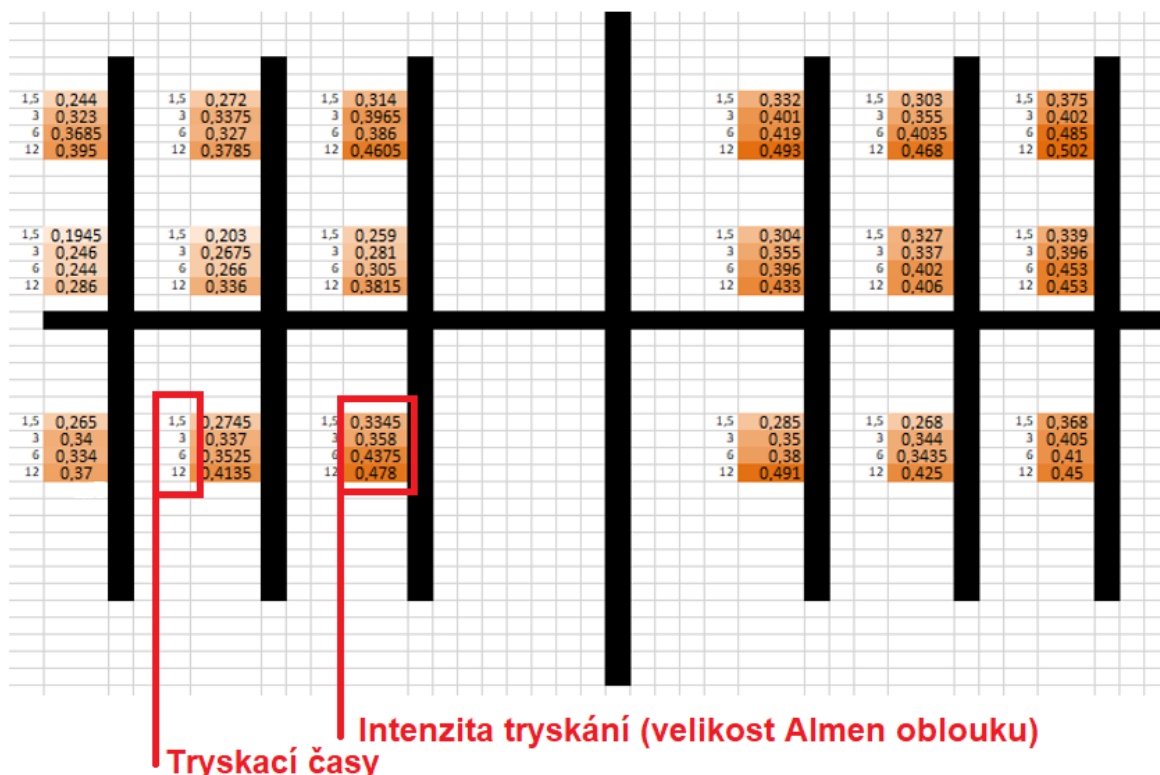
8.3 Vyhodnocení naměřených výsledků

Vzorky byly vytvořeny pro tři různé nastavení úhlů metacích kol a to A, B, C. Pro každé nastavení úhlů byly vzorky vytvářeny na třech různých průměrech speciálního závěsu. Vzorky byly vždy vyrobeny ve čtyřech časech. Podrobnější popis těchto nastavení můžeme najít v kapitole 8.1. U každé destičky byly naměřeny dvě hodnoty velikosti prohnutí. Z nich byl vytvořený aritmetický průměr a s ním bylo dále pracováno.

Tři nastavení úhlů, ve třech průměrech, čtyřech časech a pro 6 různých poloh na závěsu nám dalo celkově 216 destiček k vyhodnocení. Všechny výsledky byly zaznamenávány do tabulek, jak je vidět v předchozí kapitole 8.2.

Pro názorné vyhodnocení takového množství dat byl navrhnut grafický způsob zápisu naměřených hodnot (obr. 46). Na tomto grafickém znázornění je vidět změřená intenzita v jednotlivých pozicích na speciálním závěsu. Zároveň jsou zde vidět i jednotlivé tryskací časy. Jednotlivé hodnoty jsou také rozlišeny barevnou škálou, kdy tmavší odstín dané barvy určuje vyšší hodnoty.

Nastavení A, úhly metacích kol 140° a 220°.



Obrázek 46 – Příklad grafického znázornění naměřených hodnot

Na základě naměřených hodnoty intenzity tryskání a konzultace ve firmě bylo vybráno ideální nastavení úhlů metacích kol a to nastavení A. Nastavení bylo vybráno i na základě pokrytí co největšího portfolia zakázek a jejich požadovaných výsledných vlastností. Bralo se zde v úvahu množství kusů v zakázce, tvary jednotlivých dílců i jak často se jednotlivé zakázky zpracovávají. Pro toto nastavení se uvedené Almen testy dvakrát opakovaly. Výsledkem byly další dvě kompletní sady dat pro nastavení úhlů metacích kol A a to sady označené AI a AII.

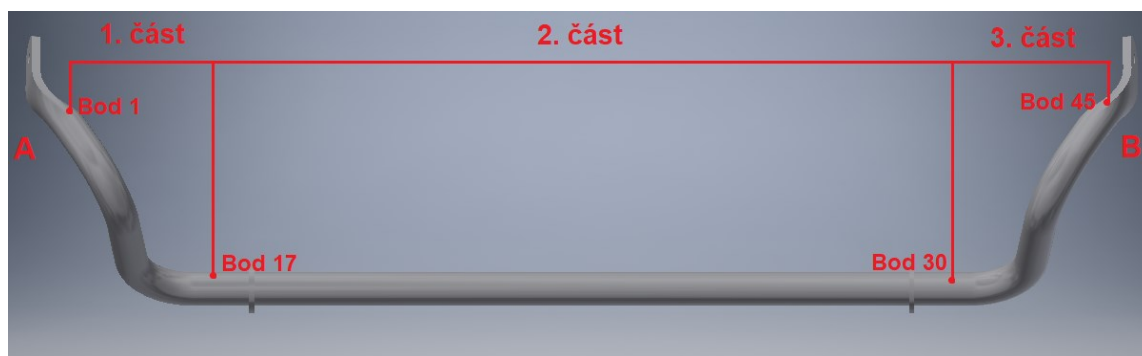
Uvedené grafické znázornění všech naměřených výsledků pro nastavení A, B, C a pro následné opakované měření AI a AII jsou uvedeny v příloze 1-5.

9. Možnost využití Barkhausenova šumu pro vyhodnocení povrchu po tryskání

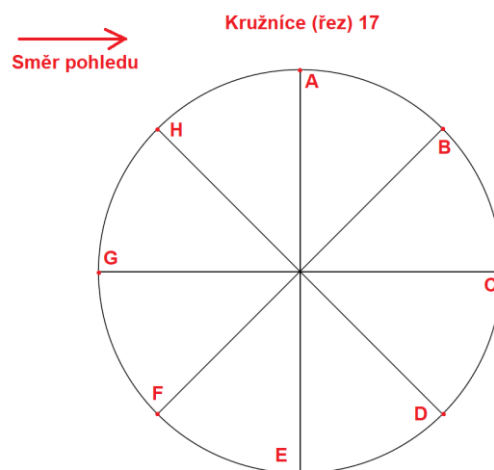
Pro možnost využití měřicí metody Barkhausenova šumu na stabilizačních tyčích bylo nejprve nutné zjistit, zda se dá metoda pro daný materiál použít. Pro měření byly dodány dvě stabilizační tyče a to ve stavu po tepelné úpravě před tryskáním (dále označovaná jako NEOT1) a druhá, ve stavu po tryskání (dále označovaná jako OT1). Materiál měřené součásti je 34MnB5 tepelně zušlechtěný na 1480-1770 MPa. Tento stabilizátor byl otryskán v standardním operačním čase 5 minut. Na těchto dvou stavech materiálu byla potvrzena aplikovatelnost měřicí metody a bylo zahájeno první měření.

9.1 První měření

Pro měření byly na stabilizační tyči naznačeny místa, ve kterých měření probíhalo. Pro měření součásti trubkového tvaru, jako je právě stabilizátor, bylo zvoleno značení, při kterém byla zvolena pomyslná linie přes celou délku tyče. Tato linie pak byla rozdělena do tří částí (obr. 47). V 1. části (tedy na ramenu stabilizátoru, až po konec posledního ohybu) byla linie proložena body po dvou centimetrech, postupně, od začátku A. V 2. části (záda stabilizátoru) byla linie rozdělena na body od sebe vzdálené pět centimetrů. Na druhém ramenu, tedy 3. části, byly body vzdálené opět dva centimetry, až po konec B. V bodech byly poté vytvořeny kružnice kolmé k ose stabilizátoru. Kružnice byla rozdělena na pomyslný osmiúhelník, pro možnost měření po obvodu tyče. Kružnice, tedy pomyslné řezy, byly postupně označeny čísly 1-45. Body na kružnicích pak A-H (obr. 48).



Obrázek 47 - Měřené části stabilizační tyče



Obrázek 48 - Schématické znázornění měřených bodů na obvodu v řezu



Obrázek 49 - Začátek značení bodů



Obrázek 50 - Naznačené kružnice a body pro měření

Postup měření:

- Nastavení měřicího přístroje na požadované parametry.
- Přiložení měřicí sondy na první bod na první kružnici, tedy bod 1A.
- Chvilková prodleva pro ustálení měřených hodnot.
- Zapsání a uložení naměřených hodnot do zařízení.
- Následuje měření na dalších bodech kružnice 1B, 1C atd.
- Postupné změření všech 45 kružnic a všech bodů na nich.

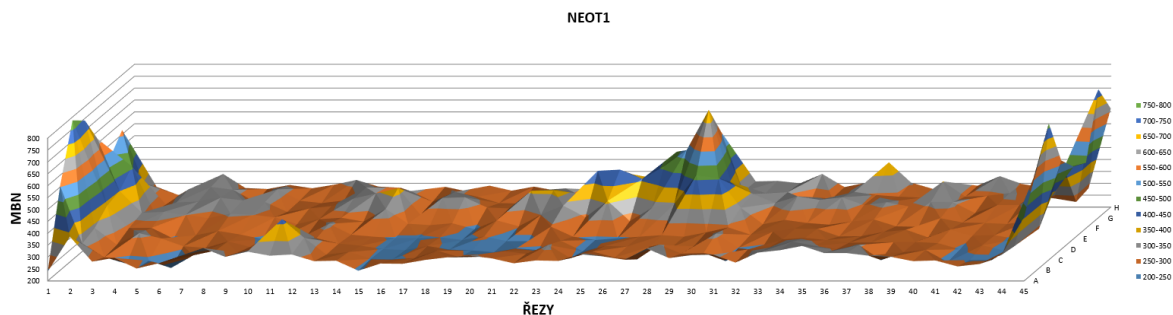
Všechny naměřené hodnoty byly zapsány do textového souboru a následně převedeny a zpracovány pomocí aplikace Excel.

9.1.1 Grafické zpracování prvního měření

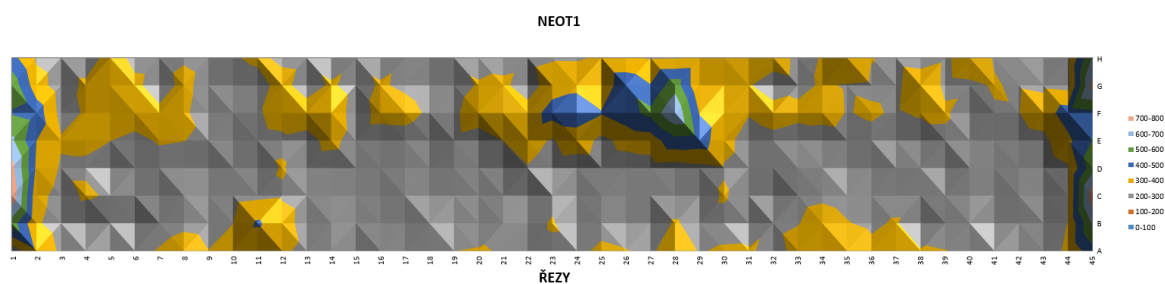
Naměřená velikost Barkhausenova šumu, dále označovaná jako MBN („magnetic Barkhausen noise“), byla pro názornost měření zavedena do prostorových plošných grafů. Tyto grafy je možné chápat jako plochu povrchu tyče s jednotlivými naměřenými hodnotami, kde máme na ose X jednotlivé řezy (kružnice 1-45), na ose Y

body na kružnici (A-H) a na ose Z velikost naměřeného signálu MBN. Dále byl vytvořen obrysový plošný graf, který ukazuje půdorys grafu prostorového.

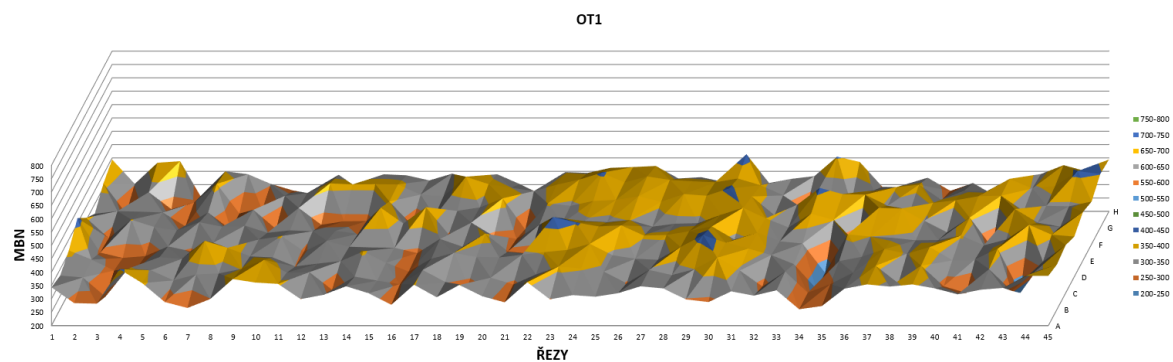
Byly vytvořeny čtyři grafy pro dva odlišné stavy NEOT1 a OT1 (obr. 51-54). Grafy v plné velikosti jsou uvedeny v příloze 6 a 7.



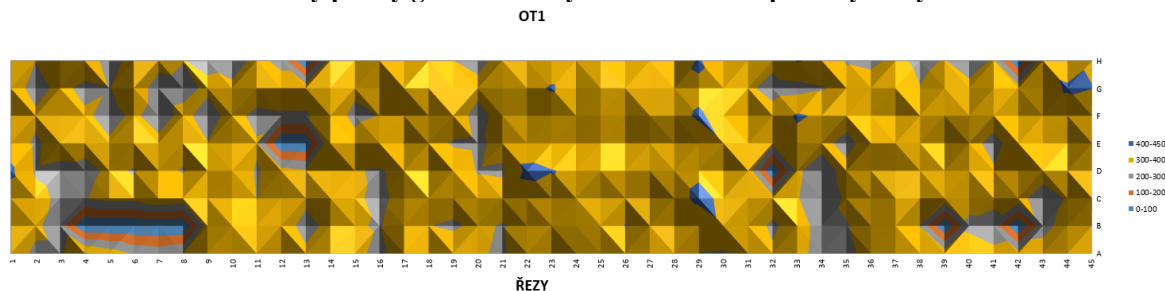
Obrázek 51 – Prostorový plošný graf naměřených hodnot MBN pro neotryskaný stabilizátor NEOT1



Obrázek 52 – Obrysový plošný graf naměřených hodnot MBN pro neotryskaný stabilizátor NEOT1



Obrázek 53 - Prostorový plošný graf naměřených hodnot MBN pro otryskaný stabilizátor OT1

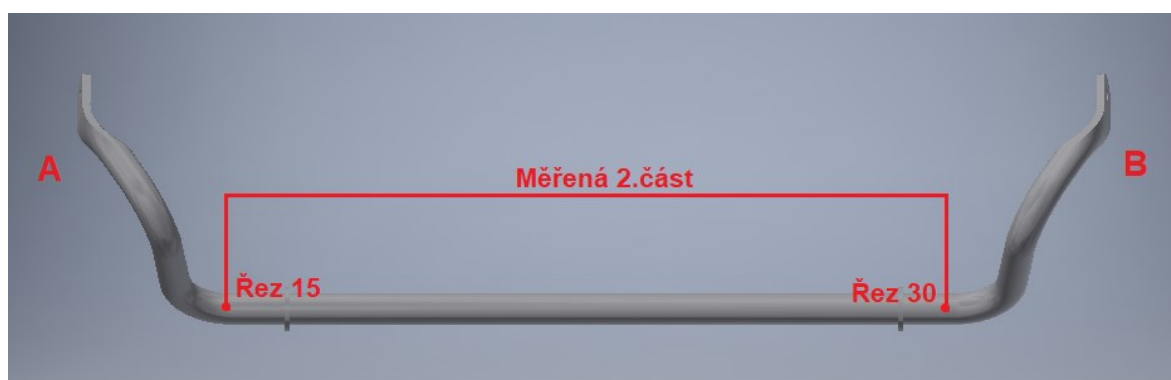


Obrázek 54 – Obrysový plošný graf naměřených hodnot MBN pro otryskaný stabilizátor OT1

9.2 Druhé měření

Pro druhé měření bylo použito dalších 6 stabilizačních tyčí, vždy po dvou pro různé stavy. První dvě ve stavu před otryskáním, dále značené jako NEOT2 a NEOT3. Další dvě tyče otryskané nestandardním časem 2 minuty, dále značené jako SOT1 a SOT2. Tyto dvě součásti se dají podle interních požadavků považovat za špatně otryskané. Poslední dvě otryskané standardně na 5 min, ty jsou značené jako OT2 a OT3.

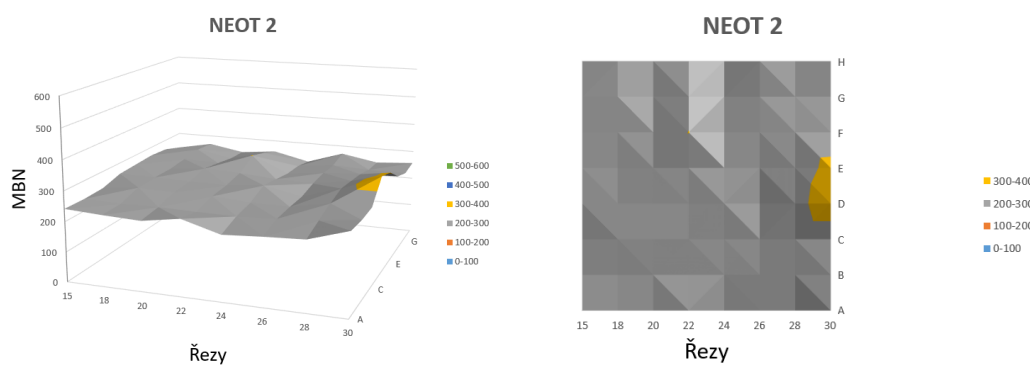
První měření probíhalo na velkém množství kružnic, v mnoha bodech. Výsledek nám poskytl celkový obraz, ale měření na kruhové součásti s ohyby bylo příliš složité a časově náročné. Z tohoto důvodu byla změněna metodika měřených míst. Měření probíhalo jen na 2. rovné části stabilizátoru, tedy na zádech (obr. 55). Navíc bylo zmenšeno množství měřených kružnic. Byly přeneseny rozměry z prvního měření a měřilo se zde ob jednu kružnici. To znamená, že mezi kružnicemi byla vzdálenost 10 cm. Měření zde odpovídalo měření na kružnicích 15, 18, 20, 22, 24, 26, 28 a 30 z prvního měření. Na těchto kružnicích bylo změřeno opět osm bodů po obvodu a to body A-H.



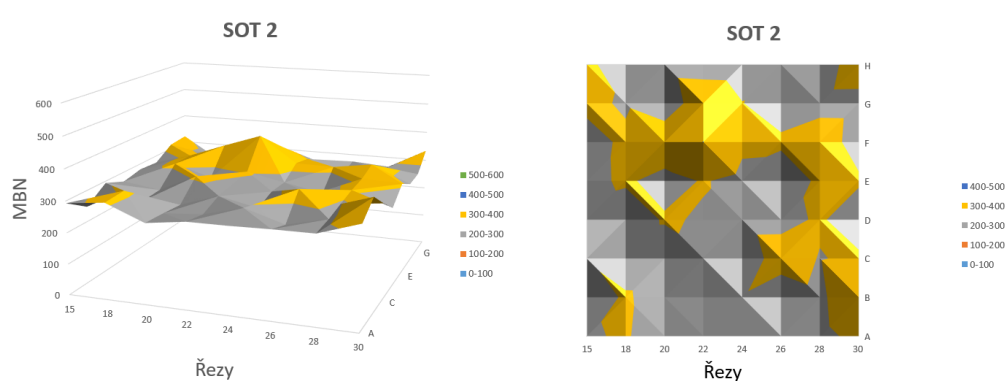
Obrázek 55 - Měřené části stabilizační tyče 2

9.2.1 Grafické zpracování druhého měření

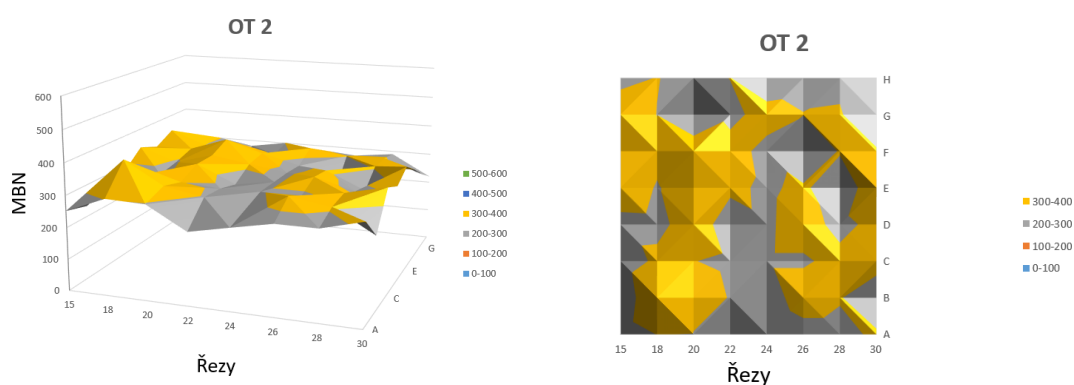
Pro vyhodnocení druhého měření byly použity stejné grafy jako pro měření první. Pro názornou ukázkou byly vybrány grafy pro NEOT2, SOT2 a OT2 (obr. 56-58). Grafy pro všechna měření v plné velikosti jsou uvedeny v příloze 8-13.



Obrázek 56 – Grafy naměřených hodnot MBN pro neotryskaný stabilizátor NEOT2



Obrázek 57 - Grafy naměřených hodnot MBN pro špatně otryskaný stabilizátor SOT2



Obrázek 58 - Grafy naměřených hodnot MBN pro otryskaný stabilizátor OT2

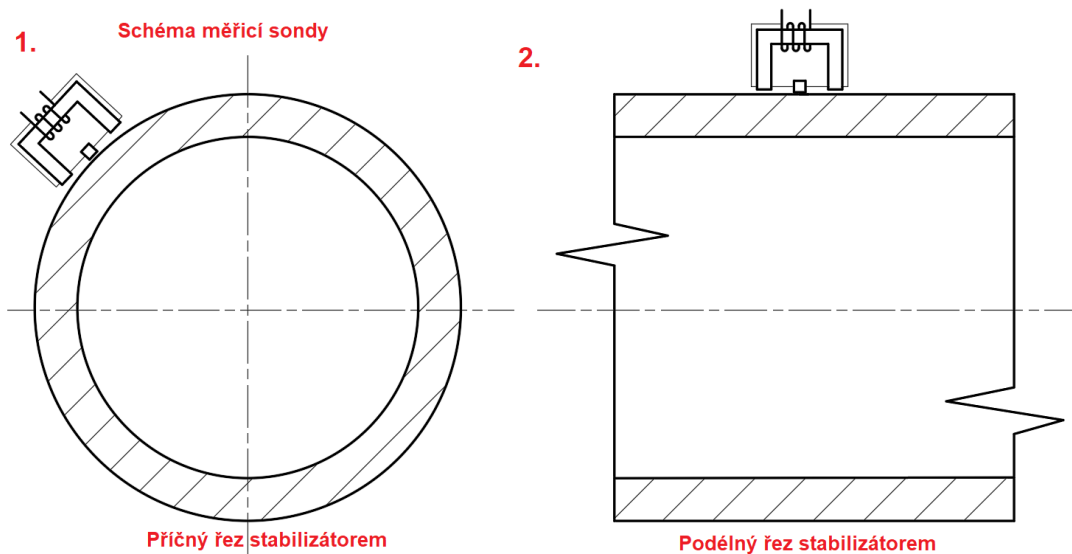
9.3 Třetí měření

Pro třetí měření byly použity stabilizační tyče z druhého měření, ale byla změněna metodika měření. Třetí měření proběhlo na stejných místech jako druhé s tím rozdílem,

že zde nebylo měřeno po obvodu, ale pouze v jednom místě, vždy v bodě 15A,18A atd., jak bylo vysvětleno v předchozích kapitole 9.1.

Při třetím měření byla také změněna citlivost měřícího zařízení. Oproti předchozím měřením tedy byly nastaveny jiné měřící parametry.

Byl zde použit i jiný směr měření, tedy směr přiložení měřící sondy. Všechna předchozí měření byla prováděna v obvodovém směru měření. Třetí měření bylo provedeno i v podélném směru. Vysvětlení problematiky podélného a příčného měření je vidět na obr. 59.

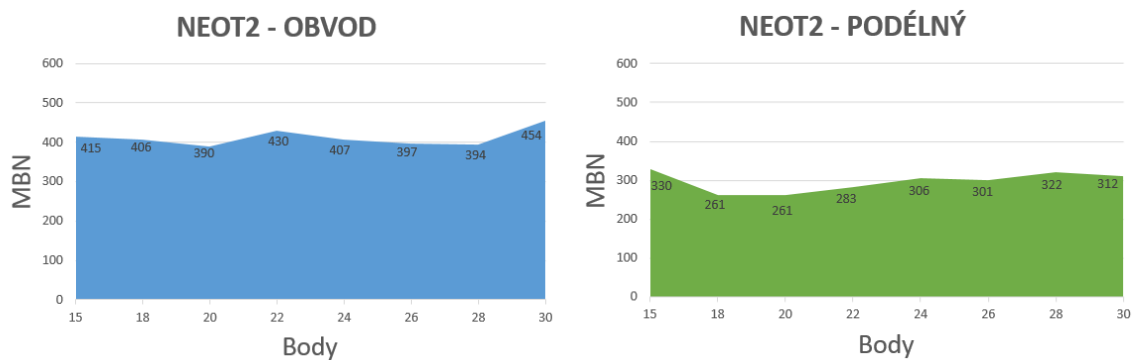


Obrázek 59 - Schéma problematiky příčného a podélného měření

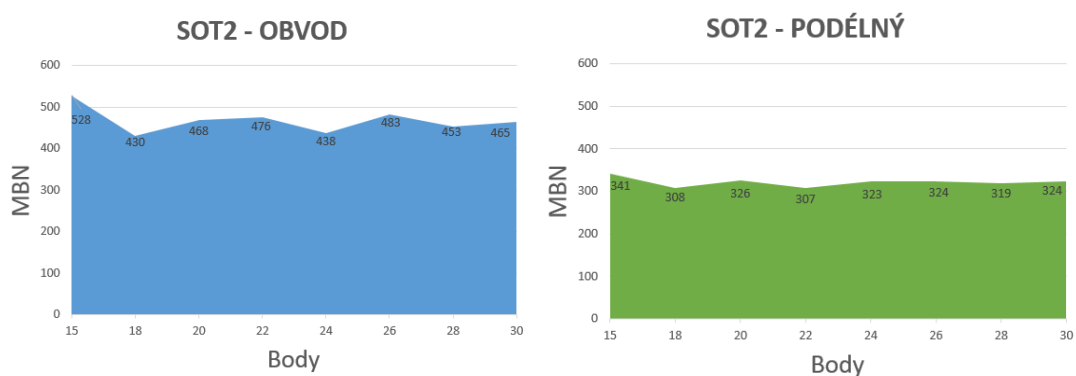
Kde 1. ukazuje měření v obvodovém směru a 2. ukazuje měření v příčném směru.

9.3.1 Grafické zpracování třetího měření

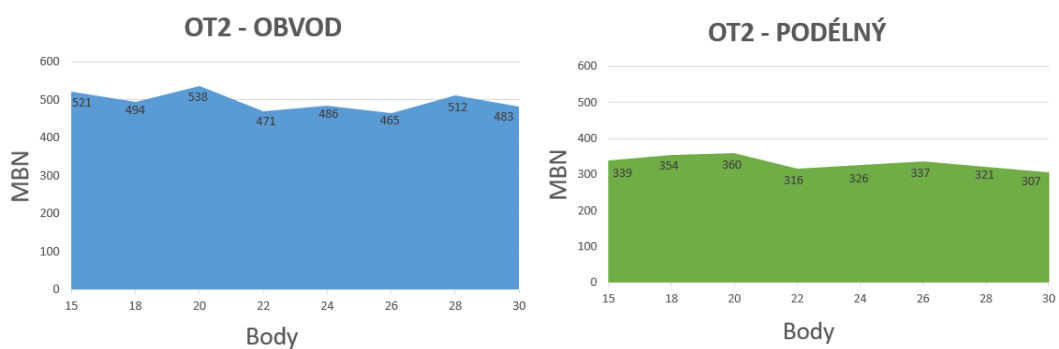
Pro grafické vyhodnocení třetího měření bylo použito klasických xy grafů, jelikož nebylo naměřeno takové množství dat. Dále byl vytvořen graf s průměrnými hodnotami v podélném i příčném směru pro všechna měření (obr. 63). Pro názornou ukázkou byly vybrány grafy pro NEOT2, SOT2 a OT2 (obr. 60-62). Grafy pro všechna měření v plné velikosti jsou uvedeny v příloze 16,17,18.



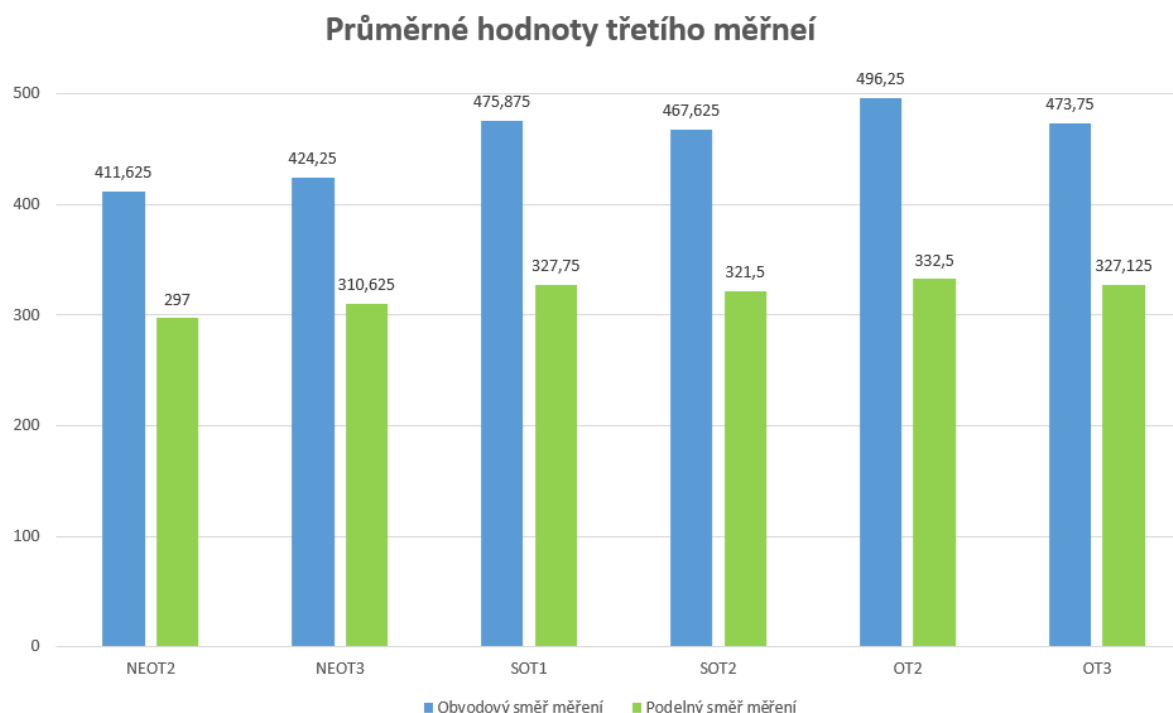
Obrázek 60 - Grafy naměřených hodnot MBN v podélném a příčném směru pro NEOT2



Obrázek 61 - Grafy naměřených hodnot MBN v podélném a příčném směru pro SOT2



Obrázek 62 - Grafy naměřených hodnot MBN v podélném a příčném směru pro OT2



Obrázek 63 - Graf průměrných naměřených hodnot z třetího měření

9.4 Vyhodnocení měření

V následující části práce jsou rozebrány graficky zpracované výsledky jednotlivých měření, jsou zde vyvozeny závěry a zároveň jsou zde uvedena doporučení pro další rozbor problematiky.

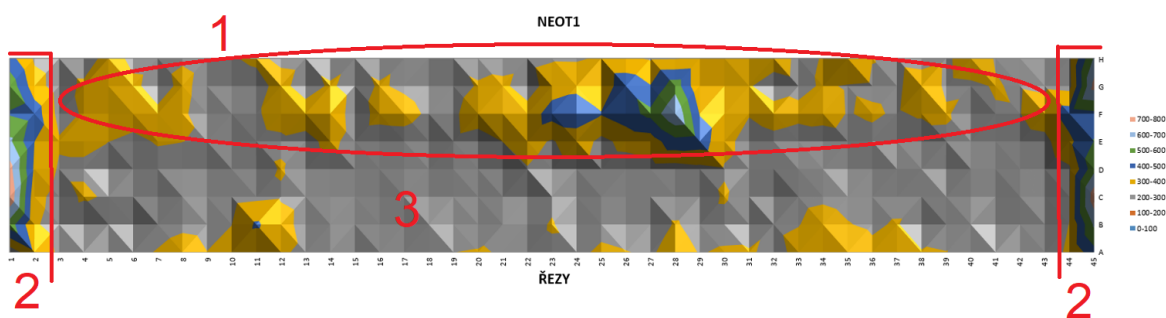
9.4.1 Vyhodnocení prvního měření

Po prvním měření jsou jasně viditelné rozdíly mezi dvěma měřenými stavy. Na obr. 64 vidíme stav před tryskáním. Měřené výsledky se dají rozdělit do tří základních částí.

Oblast 1 - oblast, kde naměřené hodnoty dosahovaly největších výchylek. Pravidelný tvar této oblasti podél celé délky ukazuje na možnost svaru, pomocí kterého jsou trubky vytvořeny. Přítomnost a potvrzení svaru by bylo potřeba prověřit pomocí metalografických zkoušek. Kolem oblasti bod 28F je patrný výskyt nejvyšších hodnot měření. Pro vysvětlení této anomálie by bylo také dobré použít metalografických zkoušek.

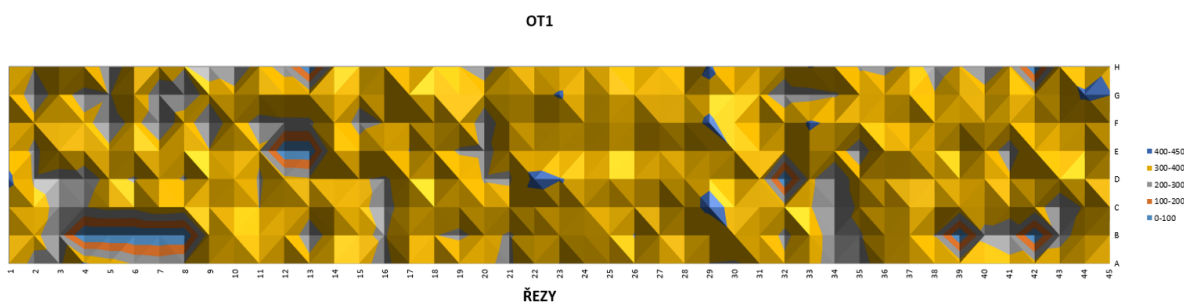
Oblasti 2 - tyto téměř souměrné oblasti vykazují zvýšené hodnoty způsobené pravděpodobně zpracováním konců stabilizační tyče. Okrajová měřená místa 1,2 a 44,45 se nacházejí v tepelně ovlivněné oblasti nahřívání konců pro zalisování.

Oblast 3 - vykazuje relativně stabilní hodnoty, jak je vidět podle barevné škály.



Obrázek 64 – Vyhodnocení prvního měření NEOT1

Na obr. 65 vidíme stav po tryskání. Hodnoty jsou oproti předchozímu stavu (oblasti 3 na obr. 64) vyšší a různorodější. Svědčí to o roztryskání povrchu a vnesení zbytkového napětí do součásti. V bodech 4B – 8B a v dalších místech, kde dosahujeme nulových hodnot (dle barevné škály) nebylo možné změřit hodnotu MBN a to z důvodu zakřivení stabilizátoru a ne úplně ideální velikosti měřicí sondy.



Obrázek 65 - Vyhodnocení prvního měření OT1

Pokud tedy porovnáme první dvě měření, tak v neotryskaném stavu dosahujeme na ploše stabilních hodnot (200 - 300 MBN) s výkyvy, které jsou pravděpodobně způsobeny vnitřní strukturou (svar, lisování konců, vnitřní vady). Tyto předpoklady jsou potřeba potvrdit pomocí řezů v daných místech a následných metalografických zkoušek.

Oproti tomu druhý stav vykazuje vyšší hodnoty (300 - 400 MBN) s vyšším rozptylem, ale bez velkých výkyvů.

Měřením je tedy možné rozlišit dva stavy materiálu, za předpokladu měření na více místech.

9.4.2 Vyhodnocení druhého měření

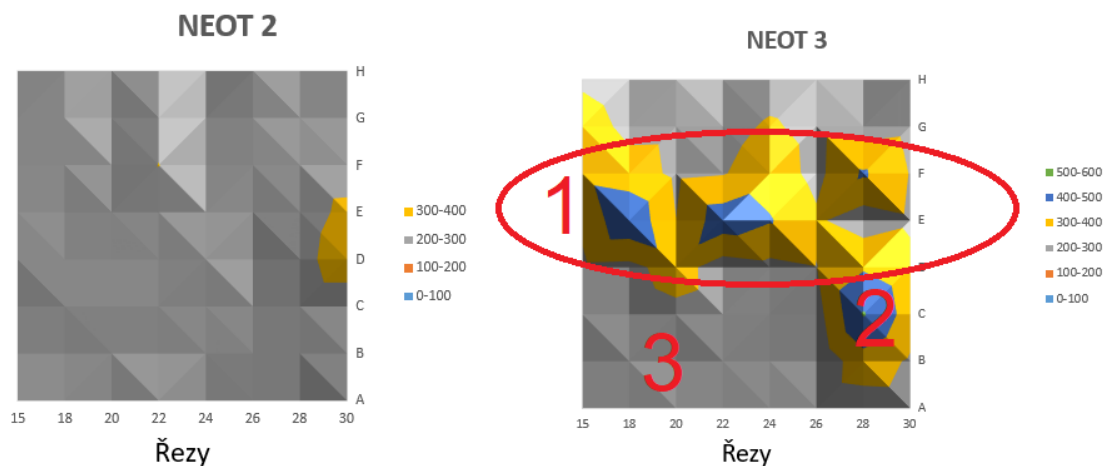
Při druhém měření byla změněna metodika měření, jak je vysvětleno v kapitole 9.2. Měření nám neposkytlo celkový obraz naměřených hodnot, ale rozdíly pro jednotlivé stavy jsou také patrné. Hlavně pak pro neotryskaný a otryskaný stav.

Na obr. 66 můžeme vidět grafy pro dva neotryskané stabilizátory NEOT2 a 3. V případě NETO2 jsou hodnoty konstantní, bez zjevných výkyvů. NEOT3 můžeme rozdělit do oblastí, podobně jako při předchozím měření kde:

Oblast 1 - znázorňuje linii vysokých naměřených hodnot. Dá se předpokládat, že jde o svar, stejně jako v předchozím měření NEOT1. Pro potvrzení místa svaru, které by mohlo ovlivňovat měření, je potřeba udělat metalografickou kontrolu jako u měření prvního.

Oblast 2 - je přilehlá oblasti 1, ale neleží v linii svaru. Toto místo by bylo dobré podrobit metalografické zkoušce, pro lepší pochopení problematiky výskytu anomálií při měření.

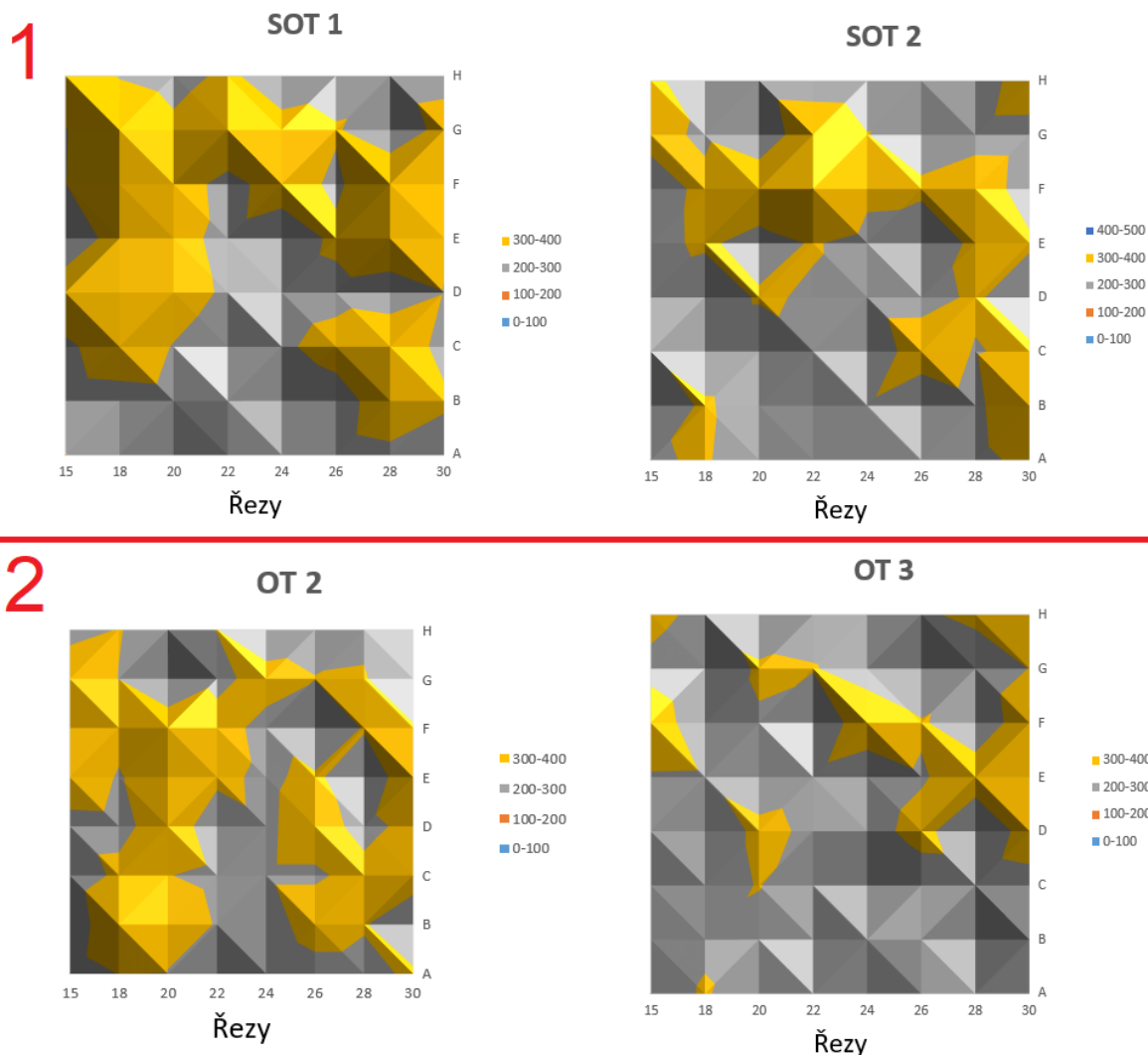
Oblast 3 - je šedá oblast, která dosahuje konstantních hodnot (200 - 300 MBN). Shoduje se s neovlivněnou oblastí u NEOT1 i NEOT2.



Obrázek 66 - Vyhodnocení druhého měření NEOT2,3

Na obr. 67 můžeme vidět grafy pro dvě špatně otryskané (1) a dvě dobře otryskané součásti (2). Z vyhodnocených grafů nelze jednoznačně určit, o který stav se zde jedná. Množství měřených bodů, s danou citlivostí měření, je pro takový závěr nedostačující. Rozptyl a výskyt hodnot v oblasti (200-300 MBN a 300-400 MBN) je v obou případech téměř stejný. Z přiložených grafů je ovšem rozeznatelné, že jde o stav po tryskání, oproti

stavu před, kde se hodnoty 300-400 MBN objevují jen ve špičkách, ale v stabilních oblastech ne.



Obrázek 67 - Vyhodnocení druhého měření SOT1,2 a NEOT2,3

V příloze 14 a 15 jsou zpracovány i hodnoty z prvního měření NEOT1 a OT1 do grafů totožných s měřením druhým. Byly z nich tedy vybrány pouze body měřené při druhém měření. I tyto grafy potvrzují předchozí tvrzení.

Změněnou metodikou (zredukováním měřených míst a měřením pouze na rovné části stabilizátoru) při druhém měření je možné rozlišit stav před a po otryskání. Rozdíly mezi naměřenými hodnotami na stabilizátoru otryskaném dvě a pět minut nejsou dostatečně vypovídající a tyto dva stavy nelze jednoznačně určit.

9.4.3 Vyhodnocení třetího měření

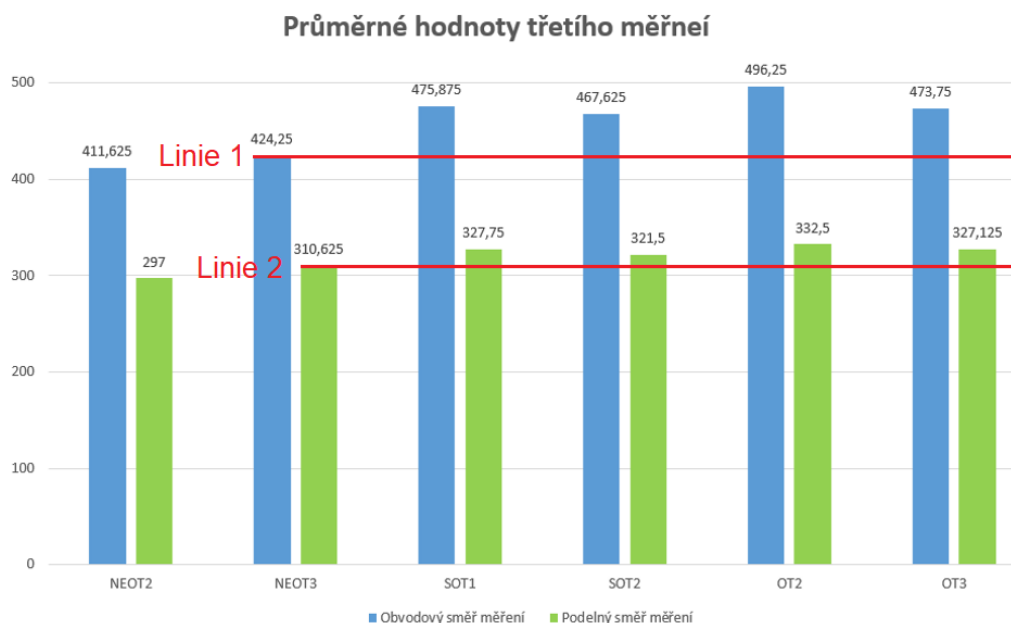
Při třetím měření byla změněna metodika měření a měřicí parametry, jak je vysvětleno v kapitole 9.3. Díky množství naměřených dat a redukovaným místům měření, nám měření neposkytlo obraz jako ty předchozí. Jedná se zde spíše o porovnání podélného a příčného směru měření s jemnějším nastavením snímání dat. Pro vyhodnocení tedy použijeme graf s průměrem naměřených hodnot na obr. 68.

Z grafu je patrné, že průměrné hodnoty v podélném směru jsou nižší než ve směru příčném. To nám dokazuje vliv směru měření na naměřené výsledky. Dále je vidět, že pro netryskaný stav jsou výsledky znatelně menší, než pro oba stavy otryskané. V případě NEOT3 vyšly řádově vyšší hodnoty než pro NEOT2. Proložili jsme tedy graf přímkami kde:

Linie 1 ukazuje, že vyšší průměrná hodnota naměřená na netryskaných součástech je pořád značně menší, než průměrné hodnoty naměřené na vzorcích otryskaných.

Linie 2 nám ukazuje totéž pro podélný směr měření. Celkové hodnoty MBN z podélného měření jsou nižší než z obvodového, proto i rozdíl oproti otryskaným hodnotám není tak markantní.

Zároveň je ale patrné, že průměrné hodnoty pro SOT a OT stav jsou podobné (ať v podélném, či obvodovém směru) a mezi stavy měření nelze jednoznačně rozlišit. Stejně jako u všech předchozích měření.



Obrázek 68 - Průměr naměřených hodnot MBN v třetím měření

9.4.4 Shrnutí vyhodnocení a navržení dalšího postupu

Z důvodu časové náročnosti a složitosti měření nebylo možné provést všechny kroky potřebné k jednoznačnému rozhodnutí o aplikovatelnosti měřicí metody Barkhausenova šumu, pro vyhodnocení integrity povrchu po procesu tryskání. Byly sepsány následující závěry a doporučení pro případný další postup a výzkum aplikovatelnosti této metody.

- Všechna tři měření nám ukázala, že metodou měření Barkhausenova šumu lze poměrně dobře rozeznat mezi stavem povrchu před tryskáním a po tryskání.
- Zároveň nám druhé a třetí měření ukázalo, že rozpoznat měřením dobře a špatně tryskaný povrch je za daného nastavení parametrů měření nemožné. Jak pro první nastavení parametrů měření, použité v prvním a druhém měření, tak pro jemnější nastavení v třetím měření. Pro kontrolu správnosti otryskání povrchu se tedy jeví tato metoda jako nevhodná a to kvůli malému rozdílu v naměřených datech.
- Naměřené výchyly v stavu před tryskáním je potřeba prověřit pomocí metalografických zkoušek. Je nutné potvrdit, zda jsou vyznačené linie vyšších hodnot opravdu způsobeny přítomností svaru či nikoliv. Další místa s vyššími výchyly je pro pochopení problematiky také nutné prověřit.
- Pro potvrzení naměřených hodnot a jejich opakovatelnost je také nutné jednotlivá měření provést znovu a potvrdit tak správnost prvních měření.
- Pro měření konkrétních hodnot zbytkového napětí pomocí Barkhausenova šumu je nutné vytvořit kalibrační vzorek. Pomocí kalibračního vzorku se poté sestaví kalibrační křivka, díky které můžeme určit konkrétní hodnoty zbytkového napětí. Pro možnost tohoto využití by bylo třeba dalších experimentů. Zároveň se toto využití jeví jako jediné využitelné ve výrobě a to pro rychlou kontrolu konkrétních hodnot zbytkového napětí po procesu tryskání, které kladou někteří zákazníci.
- Kvůli nejednoznačnosti naměřených výsledků měřených na povrchu součásti, by bylo vhodné provést i hloubkové měření, za pomoci postupného odleptávání povrchu.

Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou tryskání a jeho vyhodnocením. Úvodní teoretická část nám přiblížila podstatu a využití nápravových stabilizačních tyčí, materiály z kterých se vyrábí a zároveň nastínila teoretické poznatky o výrobním procesu stabilizátorů, se zaměřením na proces tryskání. Také jsme se zde dozvěděli něco o nastavitelných parametrech procesu tryskání. Dále byla v teoretické části rozebrána problematika zbytkových napětí a možností, jak je měřit.

První část experimentální části práce byla zaměřena na zmapování intenzity procesu tryskání pomocí Almen testů. K tomuto účelu byl firmou navržen speciální typ závěsu, na kterém bylo možné umístit Almen destičky do různých poloh a průměrů. Pro podrobné zmapování intenzity v celé kabině, za různých podmínek, byly vytvořeny tři kompletní sady dat pro tři nastavení úhlů metacích kol. V každé sadě dat byly měněny celkem tři průměry závěsu a tryskání bylo prováděno ve čtyřech časech. Tyto tři sady dat byly vyhodnoceny do přehledného grafického zobrazení. Na základě nejčastěji vyráběných typů stabilizačních tyčí a požadavků kladených na proces tryskání, bylo vybráno nejlepší nastavení a pro toto nastavení bylo měření dvakrát zopakováno. Naměřené hodnoty byly opět graficky vyhodnoceny. Výsledky této části pomohly najít nejvhodnější univerzální nastavení pro tryskání stabilizačních tyčí a zároveň vytvořily jakousi mapu intenzity tryskání v různých místech tryskací kabiny.

Druhá část experimentální části práce byla zaměřena na možnost využití měření Barkhausenova šumu na stabilizačních tyčích a následné použití pro vyhodnocení integrity povrchu. Bylo potvrzeno, že lze měřicí metodu pro daný materiál využít a bylo zahájeno měření. Na prvních dvou vzorcích stabilizačních tyčí byla použita metodika pro kompletní zmapování velikosti Barkhausenova šumu. Další měření, prováděné na dalších šesti vzorcích, bylo z důvodu složitosti měření uskutečněno na méně místech. Při třetím měření byly použity tyče z druhého měření a bylo použito jiné nastavení měřicích parametrů, spolu s jiným směrem měření. Všechny naměřené hodnoty byly vyhodnoceny do grafů, pomocí kterých byly vyvozeny závěry o měření. Z měření bylo patrné, že lze měřicí metodou rozeznat povrch před tryskáním a po tryskání. Zároveň bylo zjištěno, že povrch tryskaný kratším a delším časem je složitě rozeznat. Při měření součástí před tryskáním, se v naměřených datech vyskytovaly zvýšené hodnoty v pravidelných oblastech, které mohly být způsobeny výrobní technologií tyče a je třeba tyto místa prověřit pomocí metalografických zkoušek. Díky dosavadním výsledkům není možné jednoznačně

rozhodnout, zda by mělo využití této metody v praxi význam. Konkrétně pro hodnocení, zda je povrch dobře či špatně otryskaný, se tato metody jeví jako nevhodná. Pro potvrzení mínění a správnosti naměřených dat, by bylo vhodné měření opakovat. Zároveň by bylo vhodné provést další kroky, jako je sestavení kalibrační křivky pro měření konkrétních hodnot zbytkového napětí, nebo hloubkové měření. Tyto kroky byly mimo rozsah práce.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Vladislavu Ochodkovi za čas strávený při měření a za podmětné rady a návrhy při vypracování práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Poljakovi za jeho čas a rady, které mi věnoval při jednání jménem firmy.

Seznam použité literatury

- [1] *Salzgitter flachstah: 26MnB5* [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/26mnb5.pdf
- [2] *Salzgitter flachstah: 34MnB5* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/34mnb5.pdf
- [3] *Steelnumber: C67S / 1.1231 Steel* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=354
- [4] *MMSpektrum: Řízené kličkování* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rizene-kulickovani.html>
- [5] BLEJCHAŘ, René. *Řešení pracoviště tryskání*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Šajdlerová Iva, Ph.D.
- [6] LÁNC, Kryštof. *Problematika tryskání povrchů* [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148091. Bakalářská práce. VUT - Brno. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
- [7] *Wheelabratorgroup: What is shot peening* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/en-gb/my-application/application-by-process/what-is-shot-peening>
- [8] *Interní firemní materiály* [cit. 2018-04-15].
- [9] *Piskovacka: Vše o pískování* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.piskovacka.cz>
- [10] *I.Toušeňská s.r.o: Tryskací zařízení* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.1tousenska.cz/vyroba.php>
- [11] SCHULZE, Volker. *Modern Mechanical Surface Treatment*. Buch | Hardcover. Auflage: Wiley-VCH, 2005. ISBN 978-3-527-31371-6.
- [12] *W GRANOWSKI PTY LTD: Abrasive Blasting & Degreasing Technology* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.granowski.com.au/>
- [13] TOTTEN, George E., Maurice A. H. HOWES a Tatsuo INOUE. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio: ASM International, c2002. ISBN 0-87170-729-2.
- [14] WOJTAS, Andrzej. Analysis of residual stresses after shot peening. *Strojírenská technologie*. 2006, XI(3), 10. ISSN 1211-4162.
- [15] WAGNER, Lothar. *Shot peening*. Cambridge: Wiley-VCH, c2003. ISBN 978-3527305377.

- [16] *Shockform: Almen intensity* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://shockform.com/work/almen-intensity/>
- [17] *ROSIPAL, Martin, et al. Application of Barkhausen noise for analysis of surface quality after machining. Materials Engineering*, [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://fstroj.uniza.sk/journal-mi/PDF/2010/03-02.pdf>
- [18] *Seminář INTEGRITA: Poznání nehmotného světa zbytkových napětí* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: www.opi.zcu.cz/download/1_Ganev.ppt
- [19] *Zbytková povrchová napětí po obrábění* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf
- [20] *Analýza integrity povrchu broušených ozubených kol* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://www.integrita.zcu.cz/download/skola2/liberec_prez2.pdf
- [22] *Terrachem: X-ray Diffraction Analysis (XRD)* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.terrachem.de/en/x-ray-diffraction/>
- [23] *Wheelabrator: Závěsné tryskáčské zařízení typu HTS* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/cs-cz/equipment/wheelblast/hanger-type-machines/hts-hanger-type-machine>
- [24] *Clemtex: TSP-3 Almen Gage* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://clemtex.com/literature/files/2AAG.IM.pdf>
- [25] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1217-7.
- [26] *ABRANOVA s.r.o.: Abrasiva a tryskáčské materiály* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://abranova.cz/>
- [27] *StressTech: Shot peening residual stresses* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/en-fi/know-how/articles/stresstech-bulletin-14-shot-peening-residual-stresses/>
- [28] *Barkhausen effect meter MEB-2c* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://www.mag-lab.pl/stronka_en/meb-2c

Seznam příloh

Příloha 1 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení A

Příloha 2 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení B

Příloha 3 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení C

Příloha 4 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení AI

Příloha 5 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení AII

Příloha 6 – Grafické znázornění prvního měření NEOT1

Příloha 7 – Grafické znázornění prvního měření OT1

Příloha 8 – Grafické znázornění druhého měření NEOT2

Příloha 9 – Grafické znázornění druhého měření NEOT3

Příloha 10 – Grafické znázornění druhého měření SOT2

Příloha 11 – Grafické znázornění druhého měření SOT3

Příloha 12 – Grafické znázornění druhého měření OT2

Příloha 13 – Grafické znázornění druhého měření OT3

Příloha 14 – Grafické znázornění prvního měření NEOT1

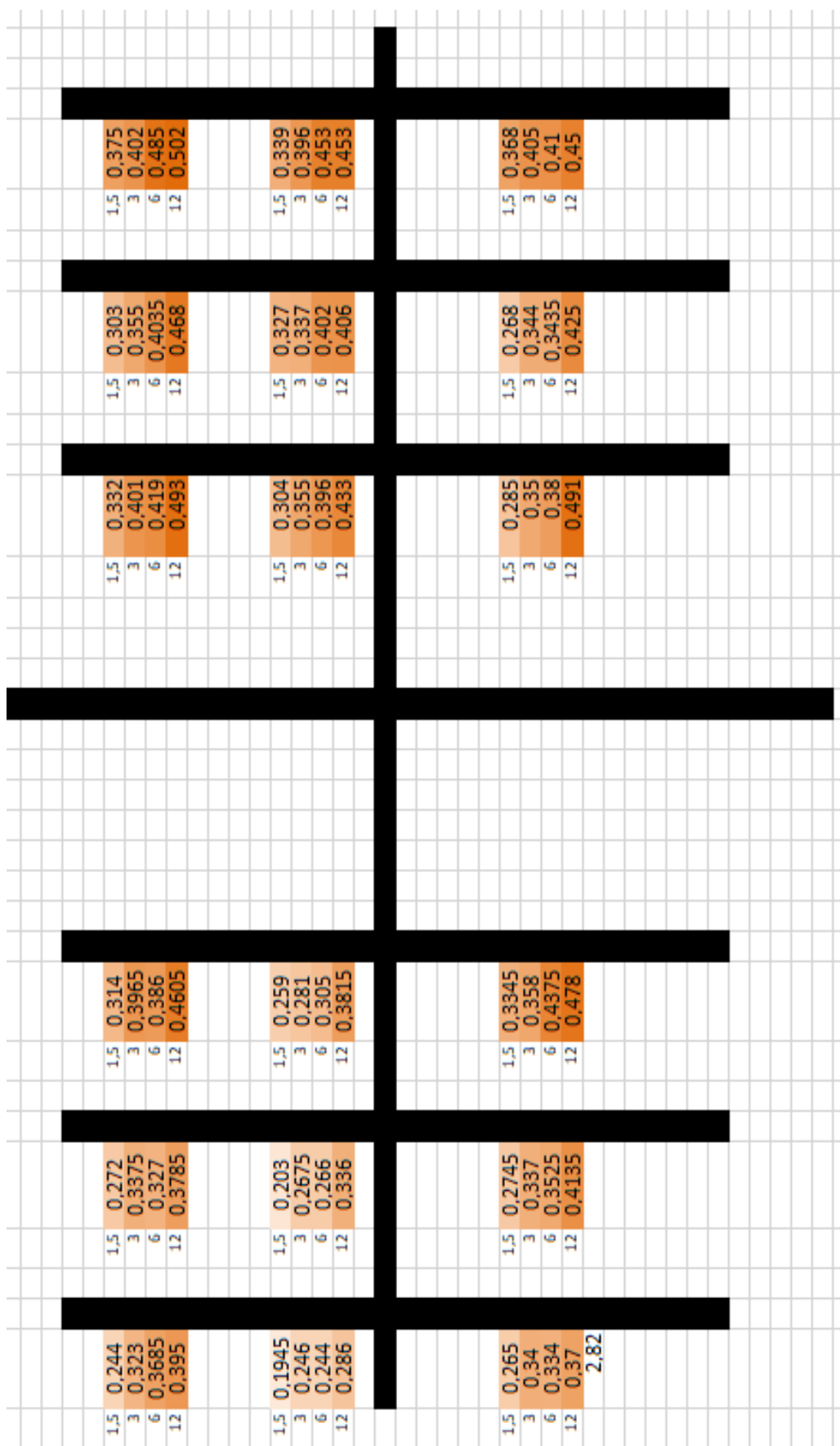
Příloha 15 – Grafické znázornění prvního měření OT1

Příloha 16 – Grafické znázornění třetího měření NEOT2,3

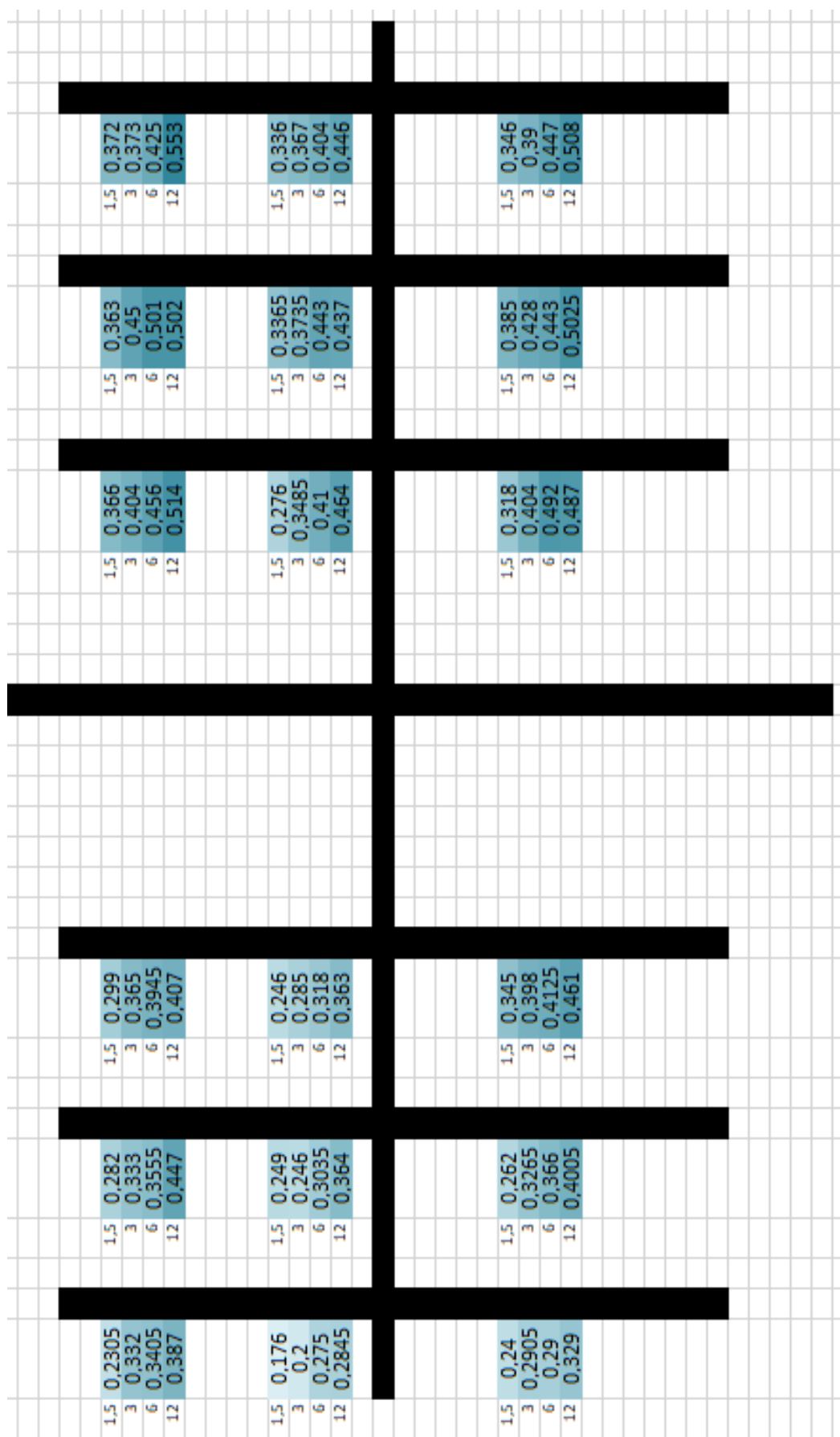
Příloha 17 – Grafické znázornění třetího měření SOT1,2

Příloha 18 – Grafické znázornění třetího měření OT2,3

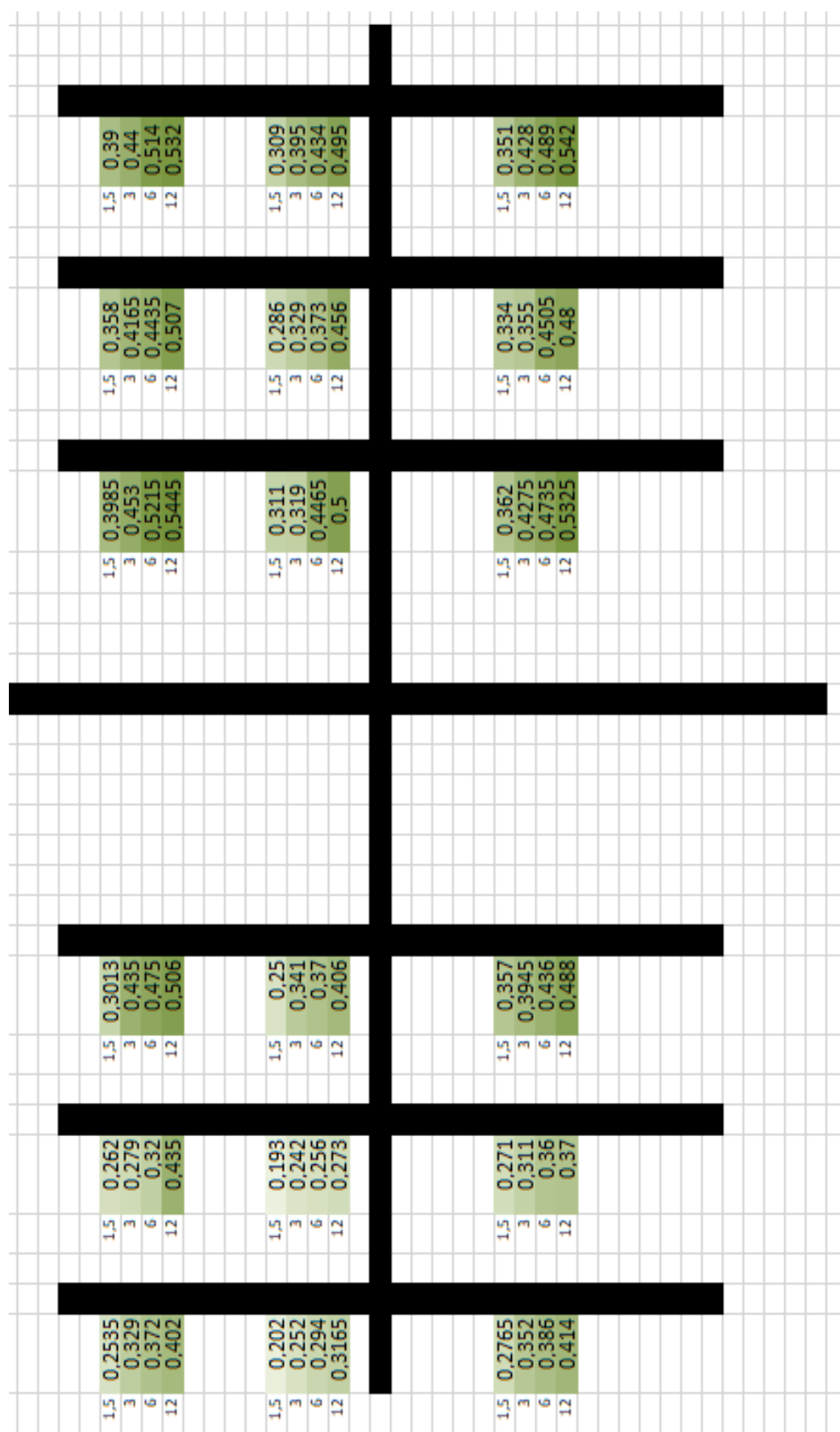
Příloha 1 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení A



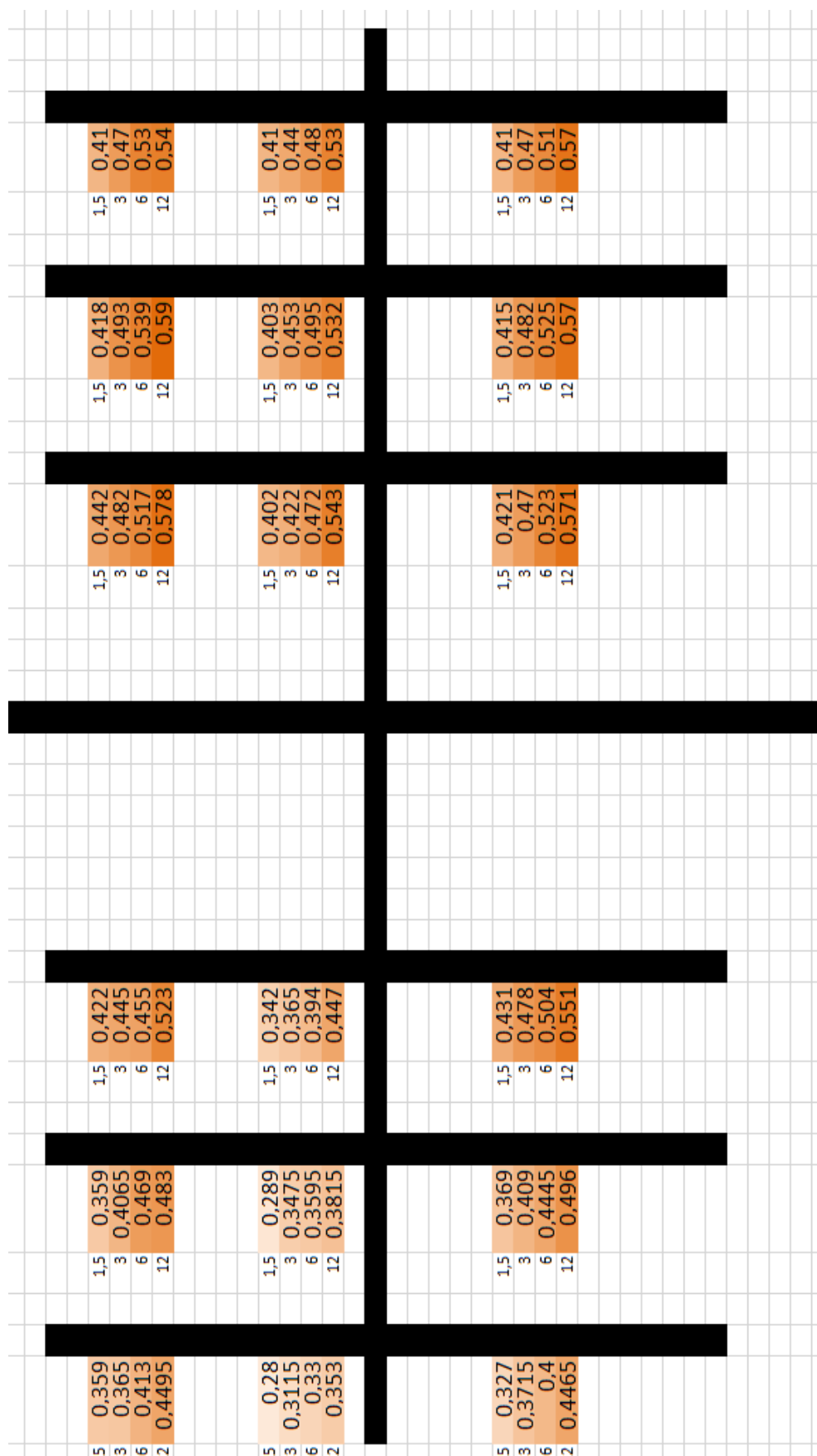
Příloha 2 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení B



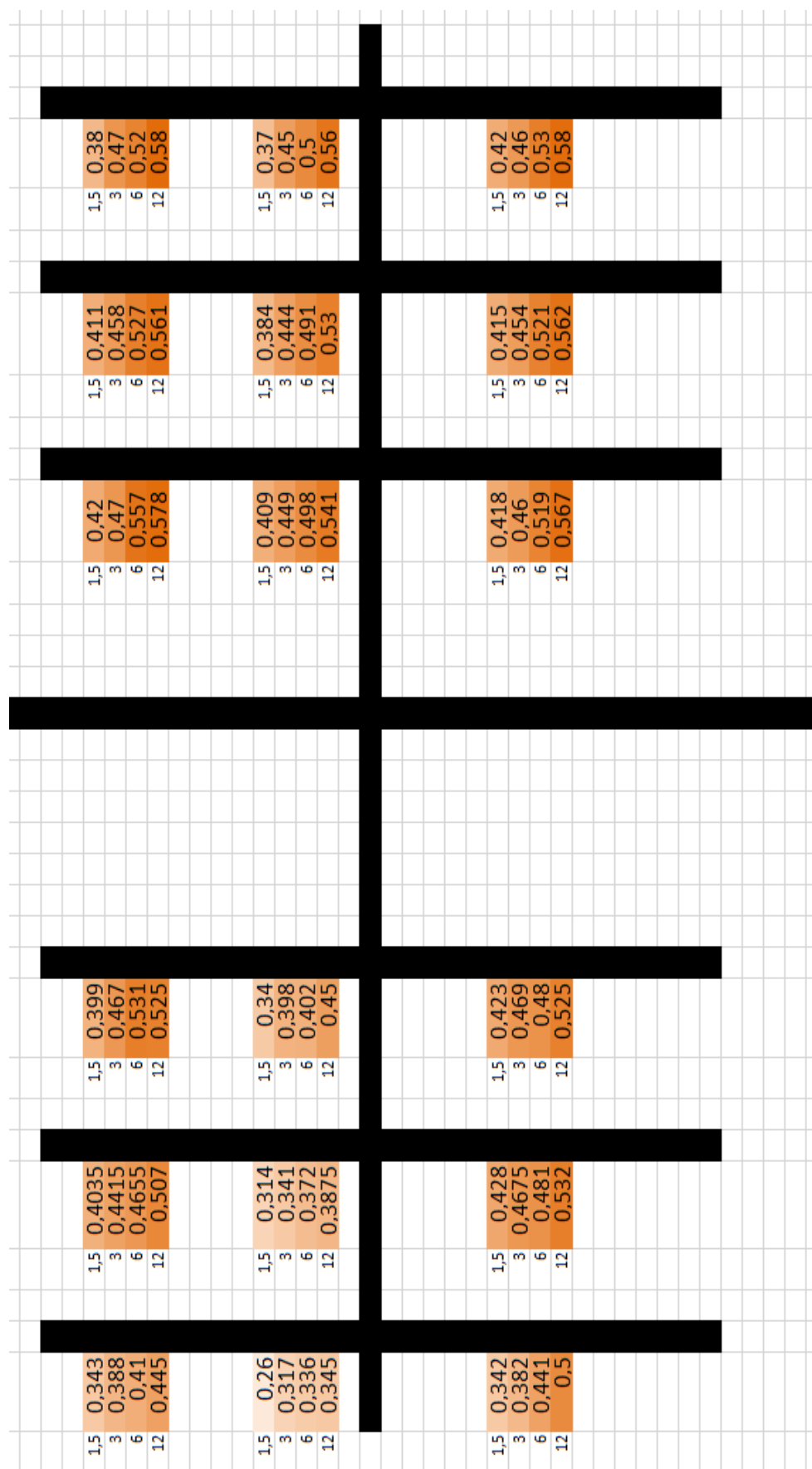
Příloha 3 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení C



Příloha 4 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení AI

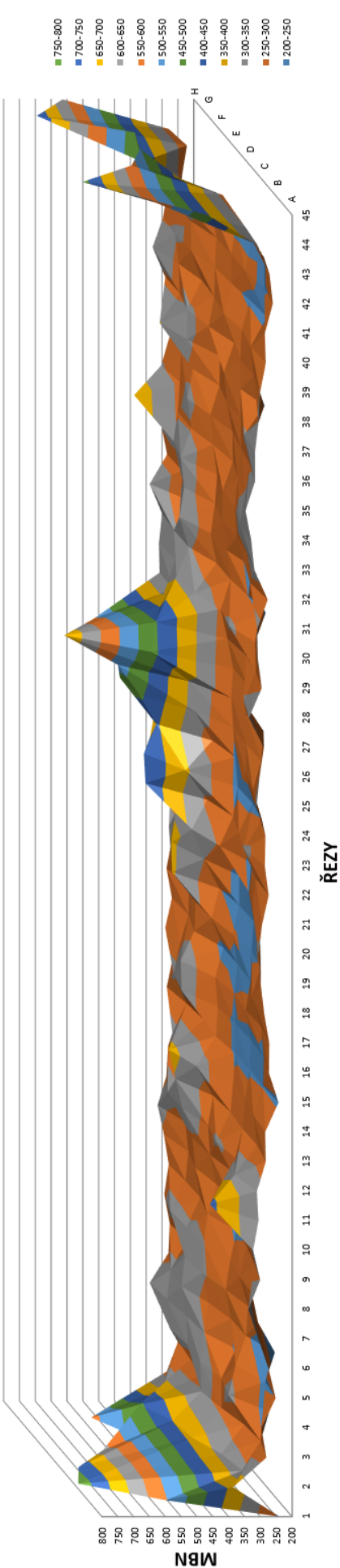


Příloha 5 – Grafické znázornění intenzity tryskání pro nastavení AII

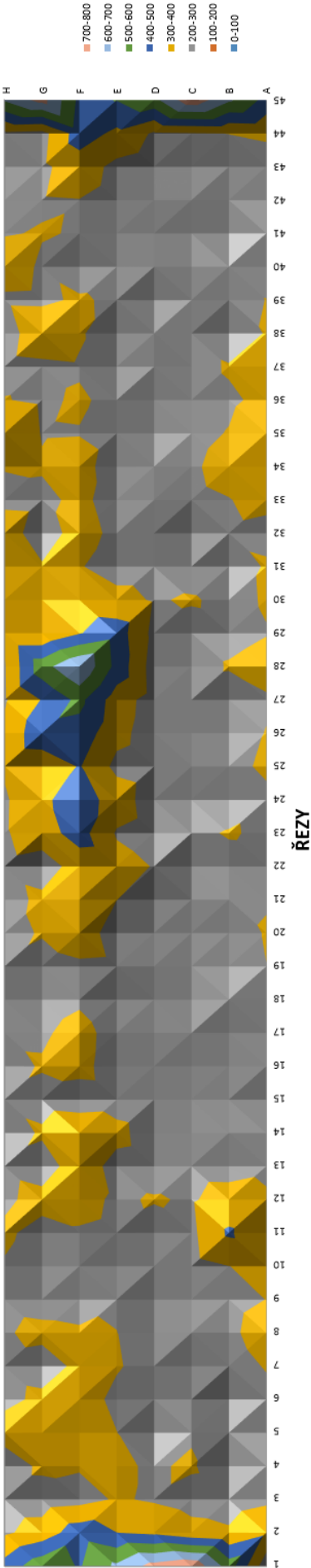


Příloha 6 – Grafické znázornění prvního měření NEOT1

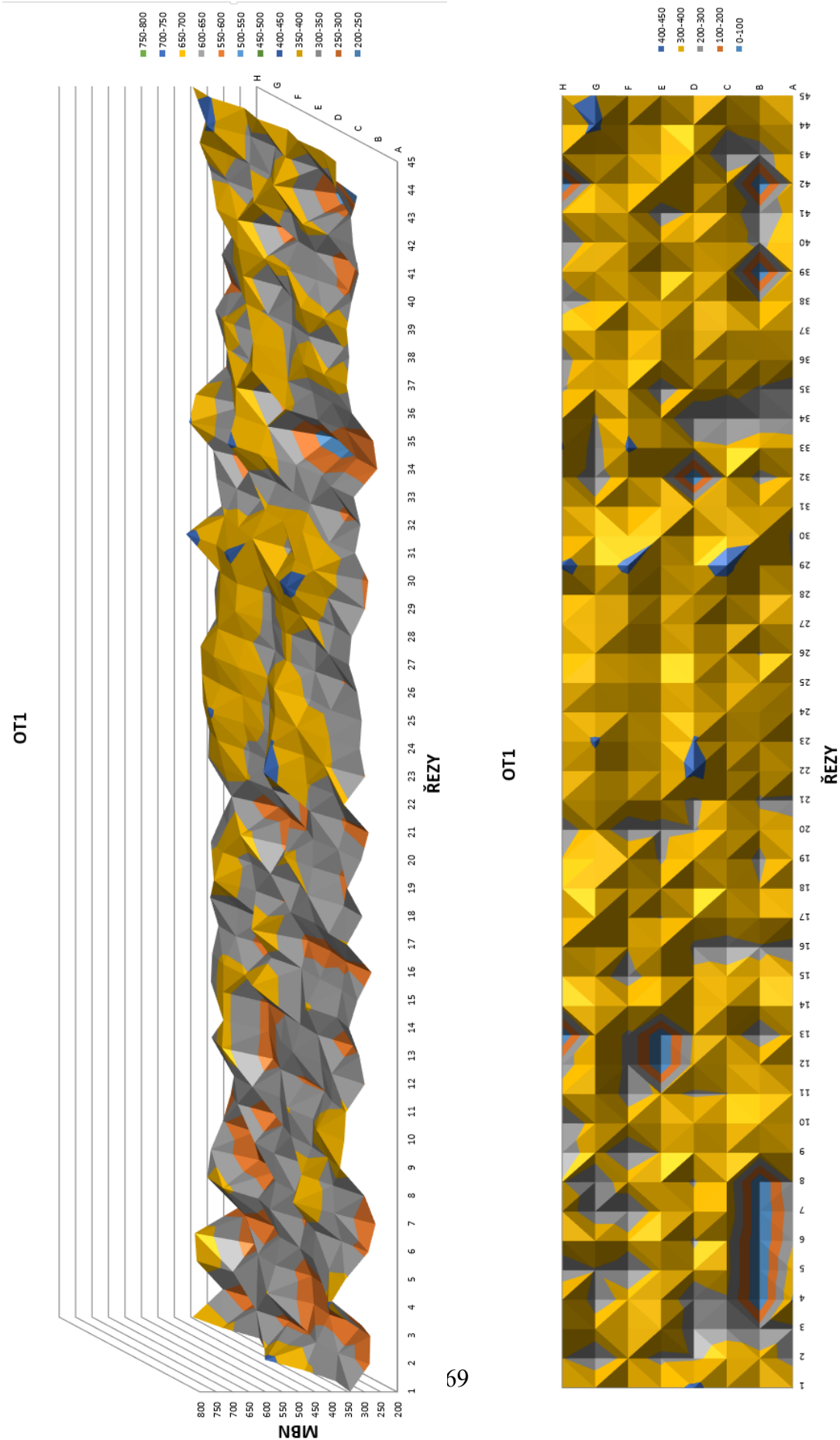
NEOT1

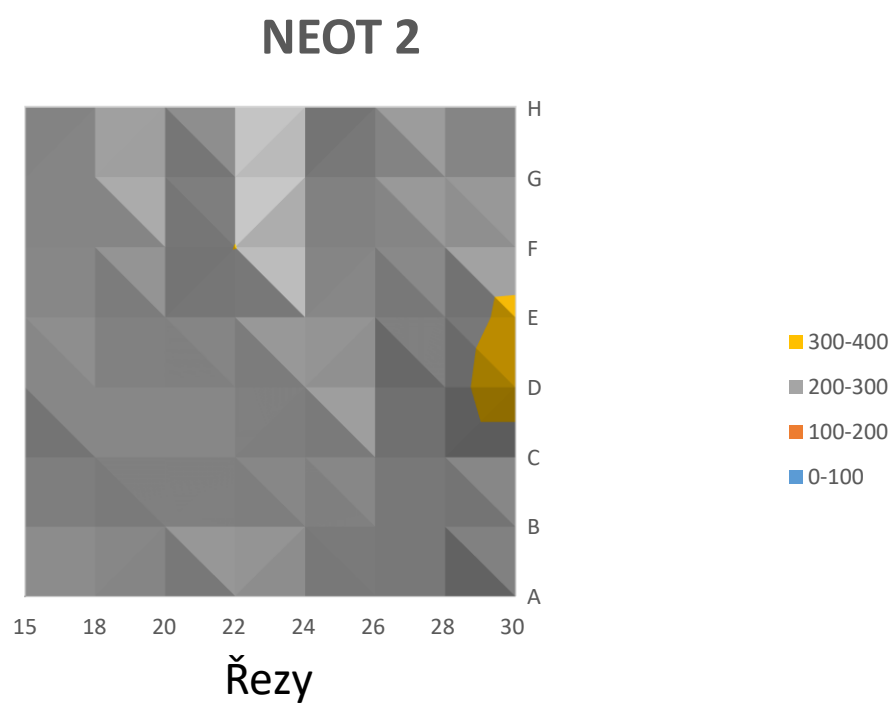
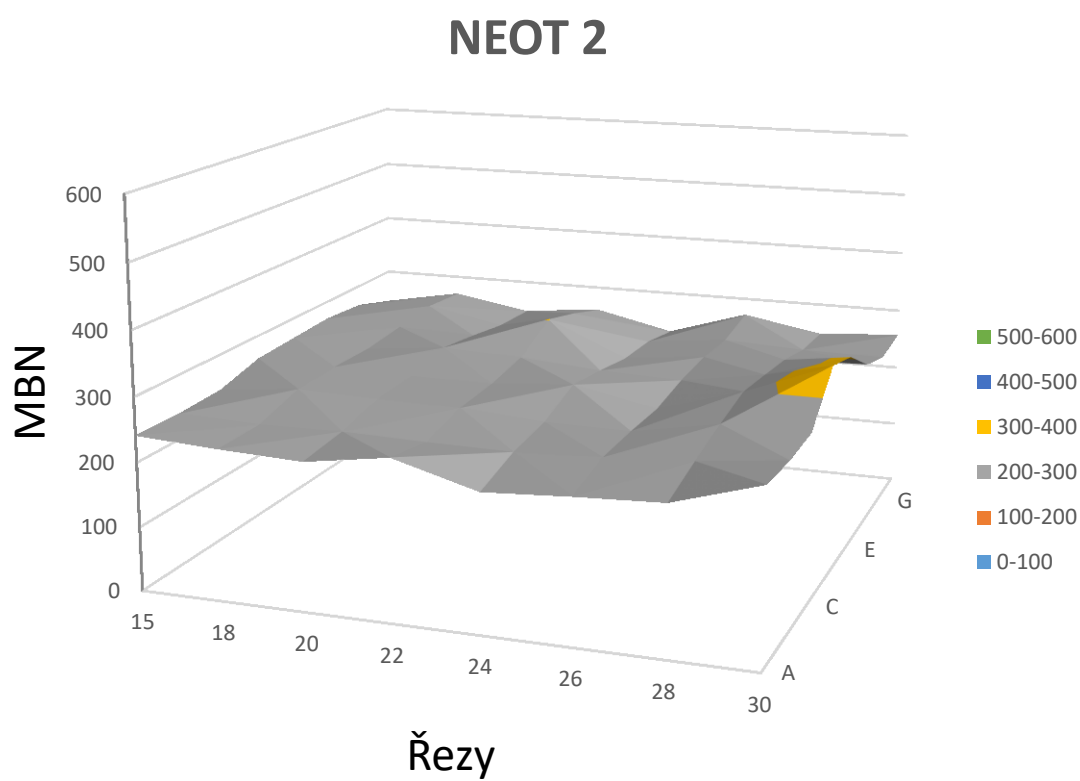


NEOT1



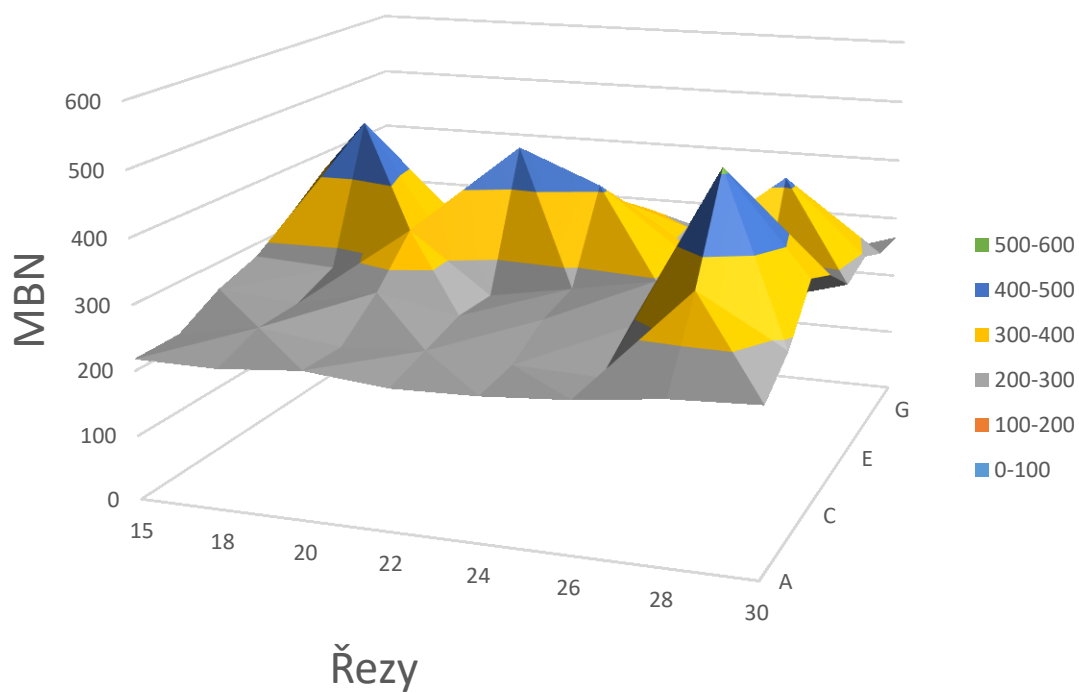
Příloha 7 – Grafické znázornění prvního měření OT1



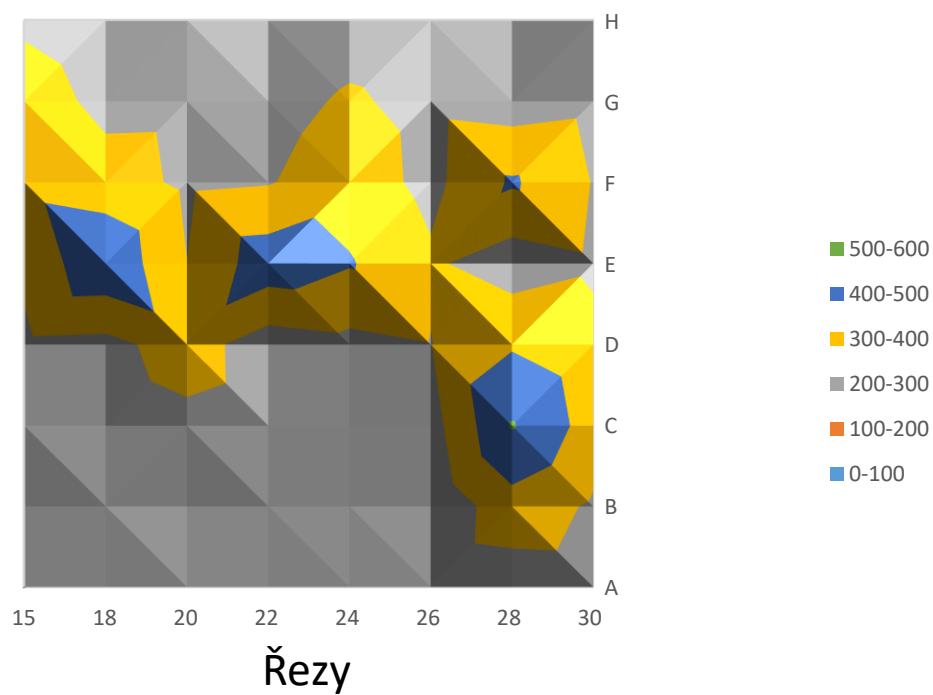


Příloha 9 – Grafické znázornění druhého měření NEOT3

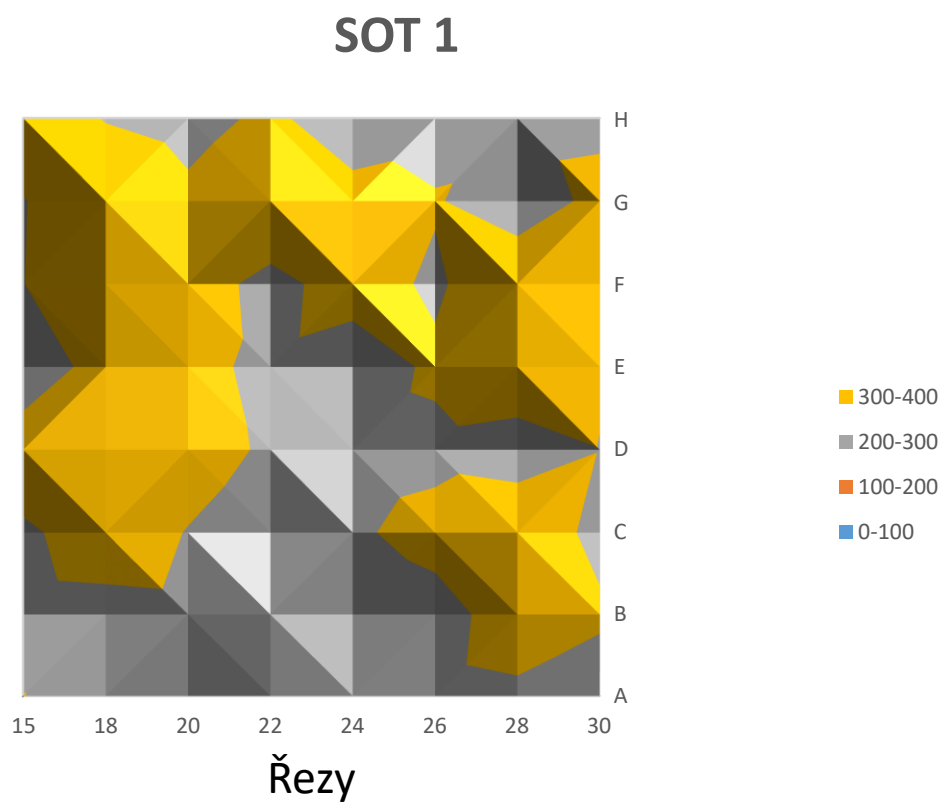
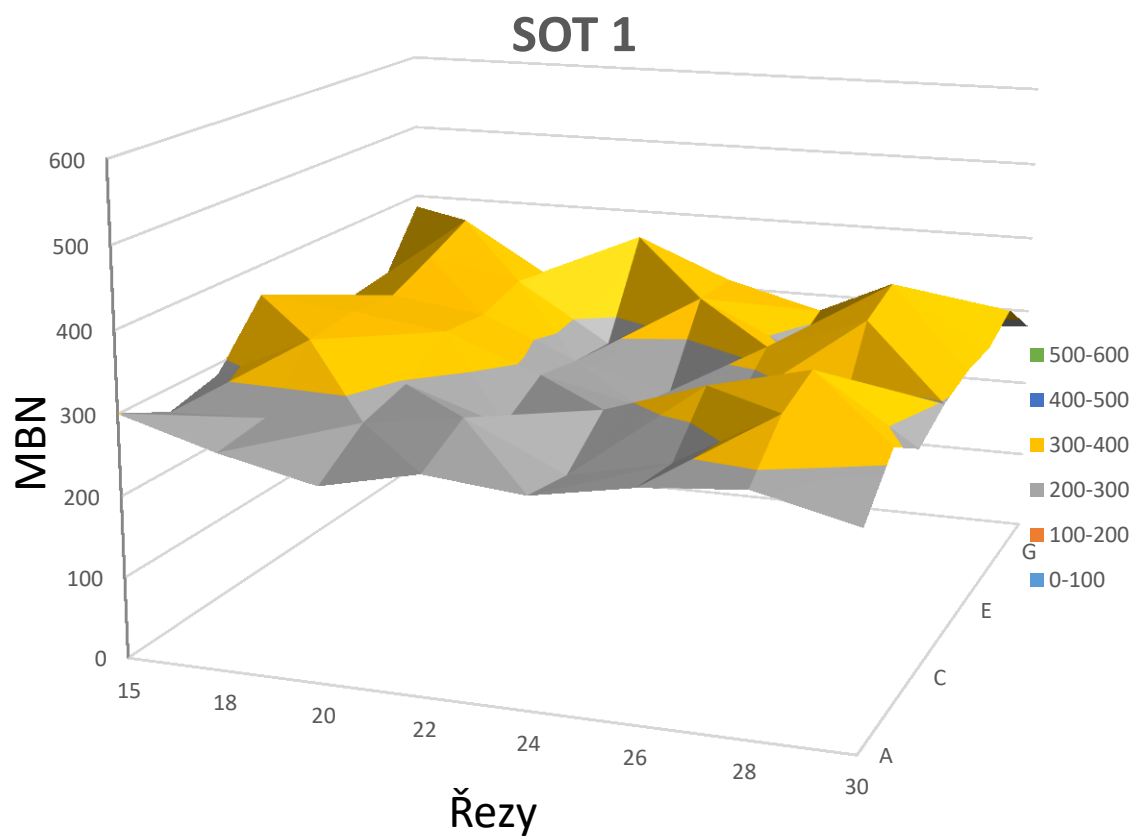
NEOT 3

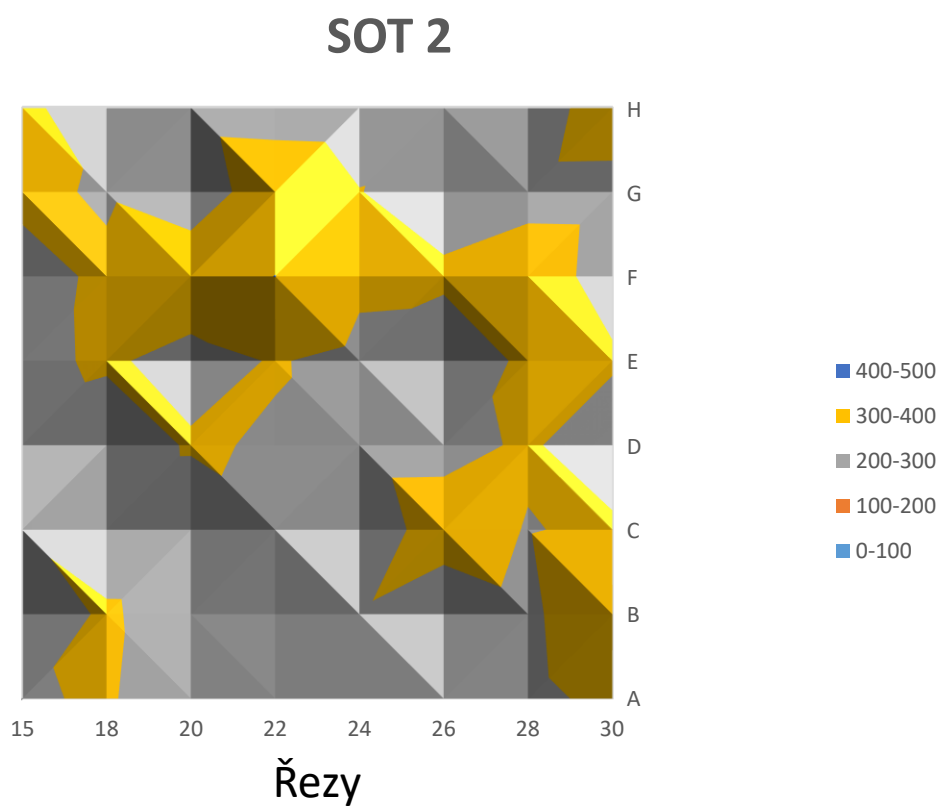
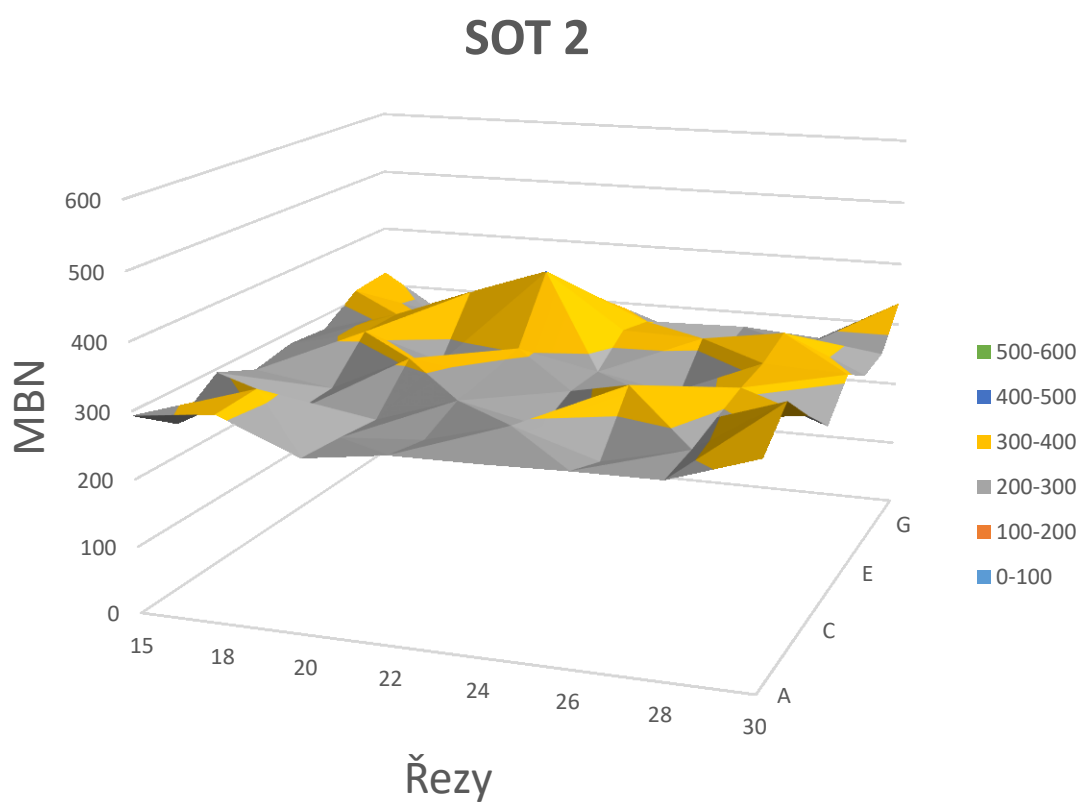


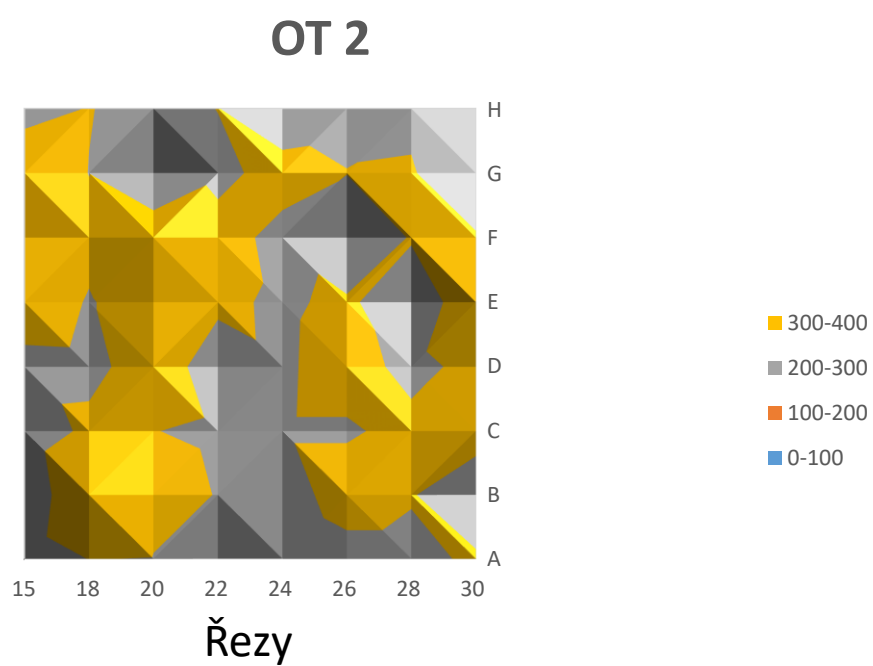
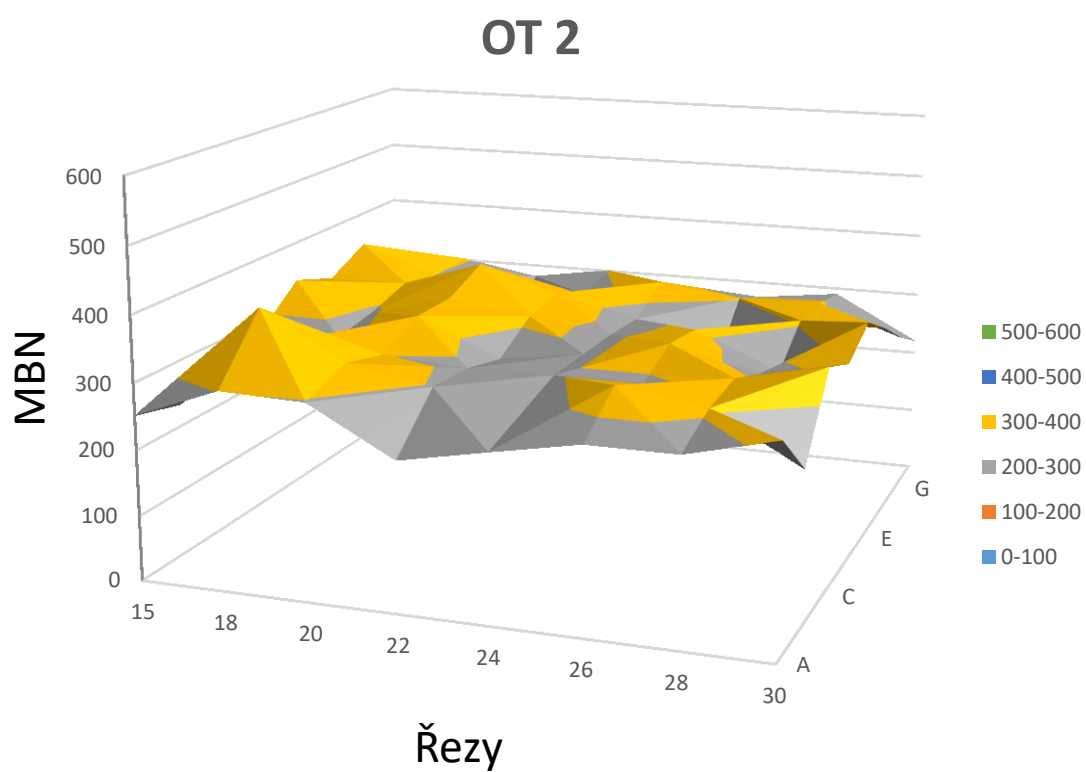
NEOT 3



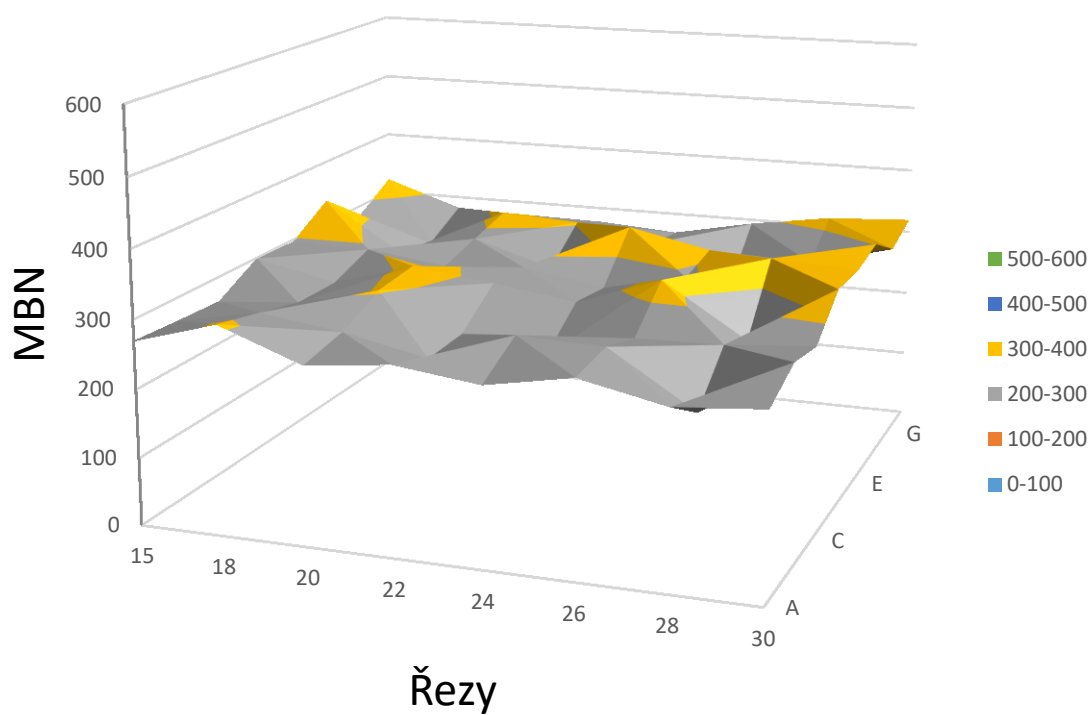
Příloha 10 – Grafické znázornění druhého měření SOT1



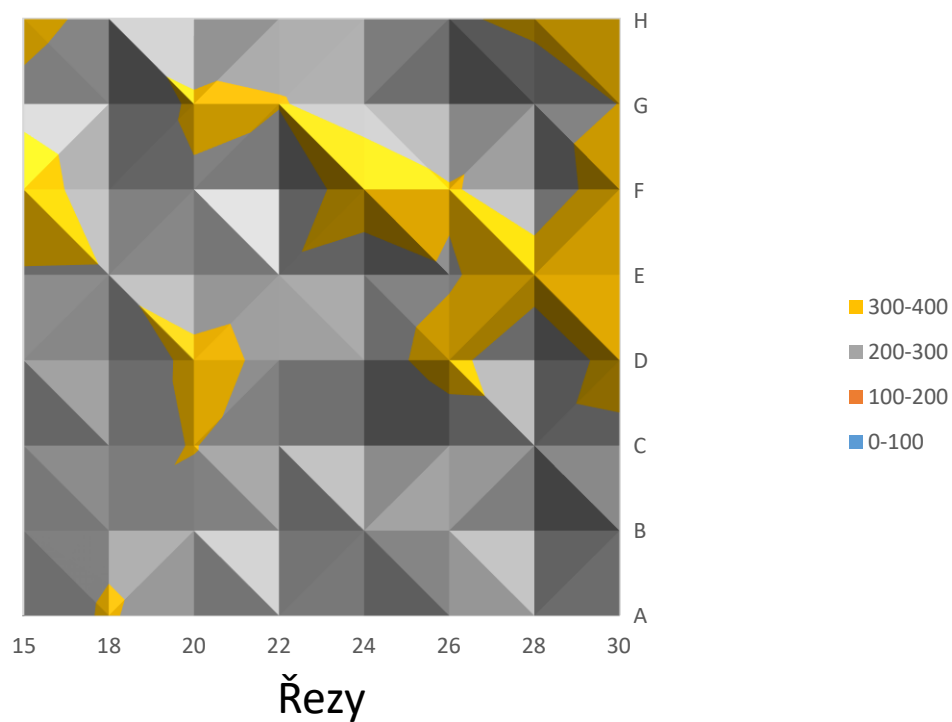




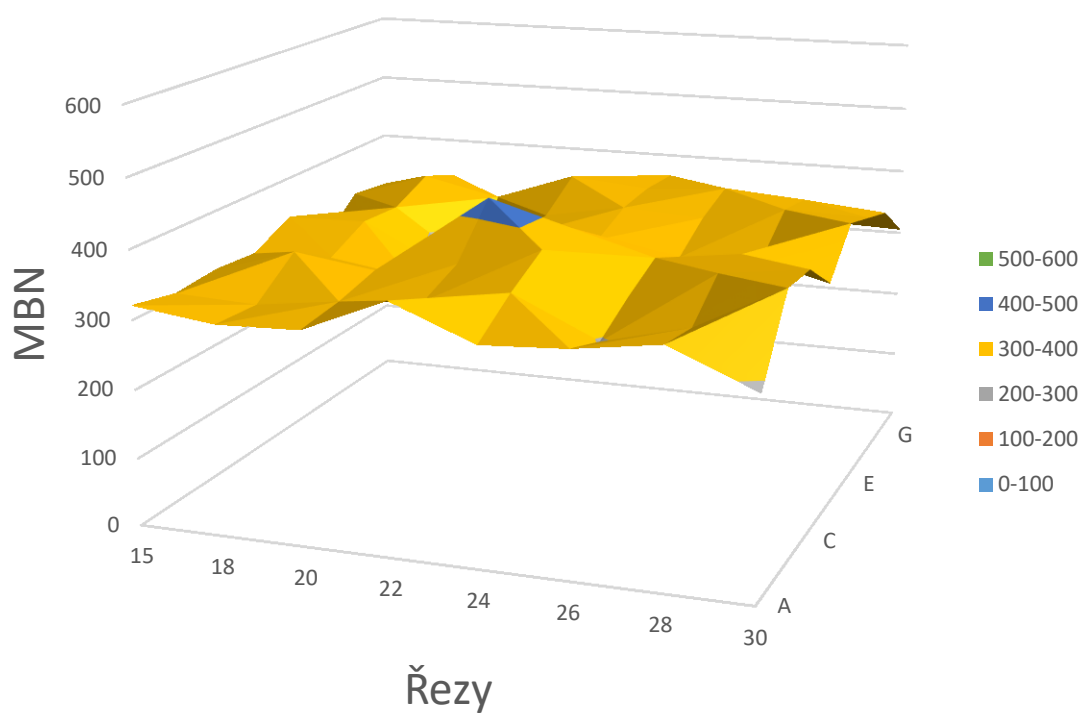
OT 3



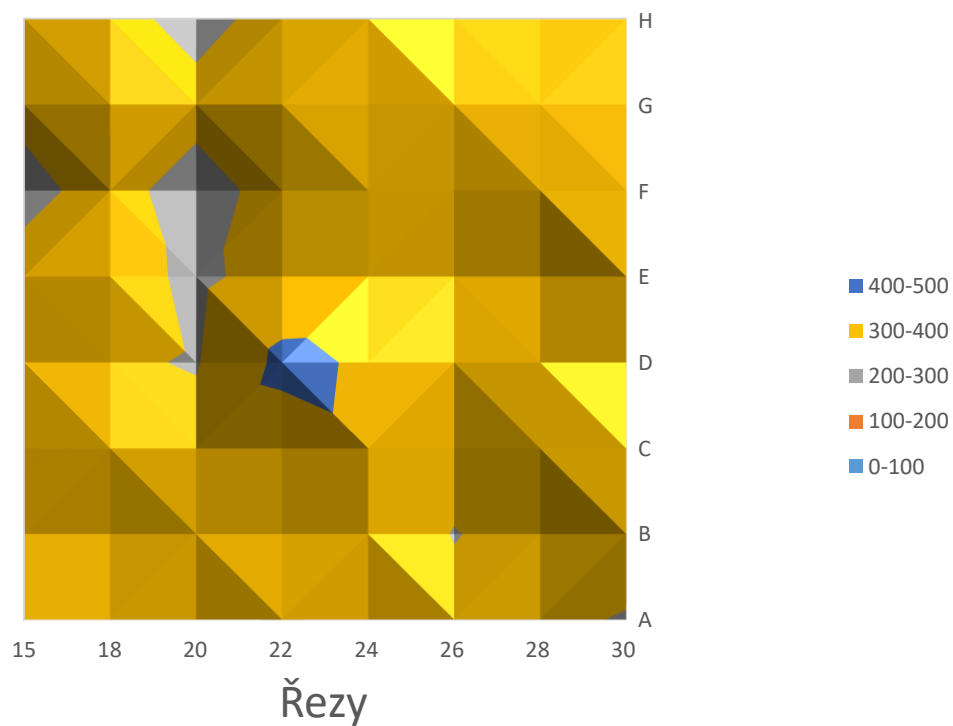
OT 3



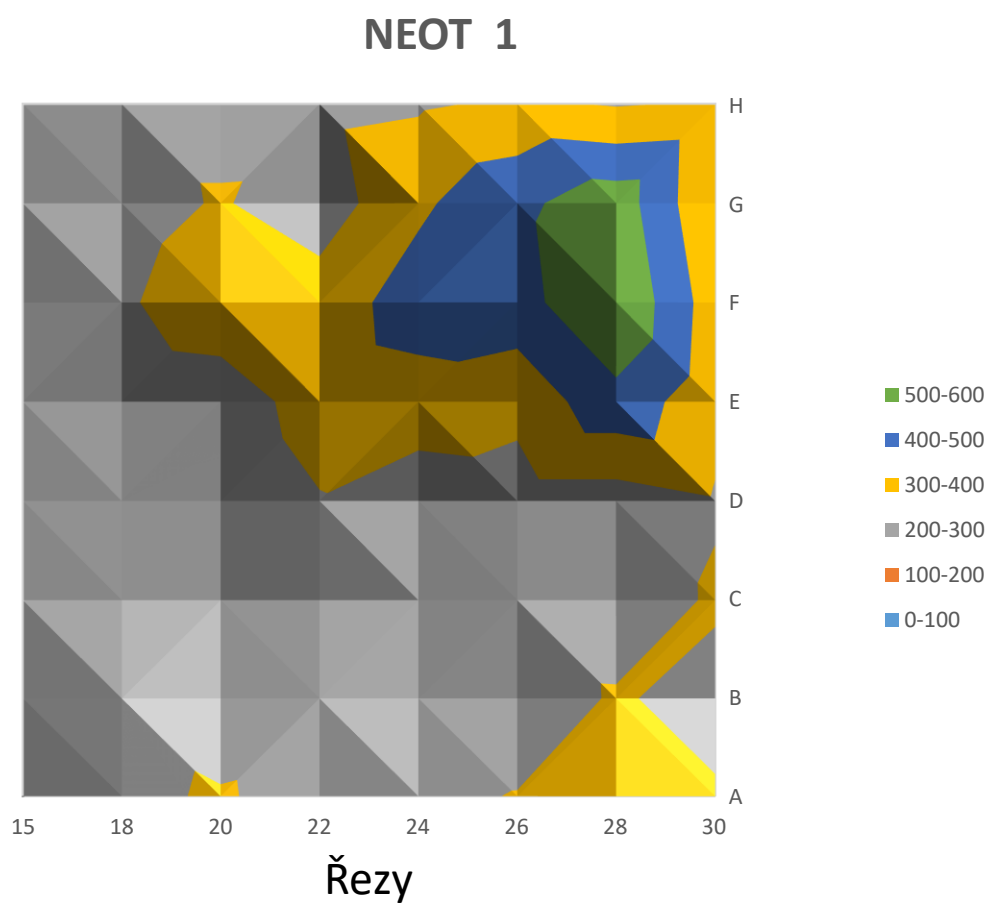
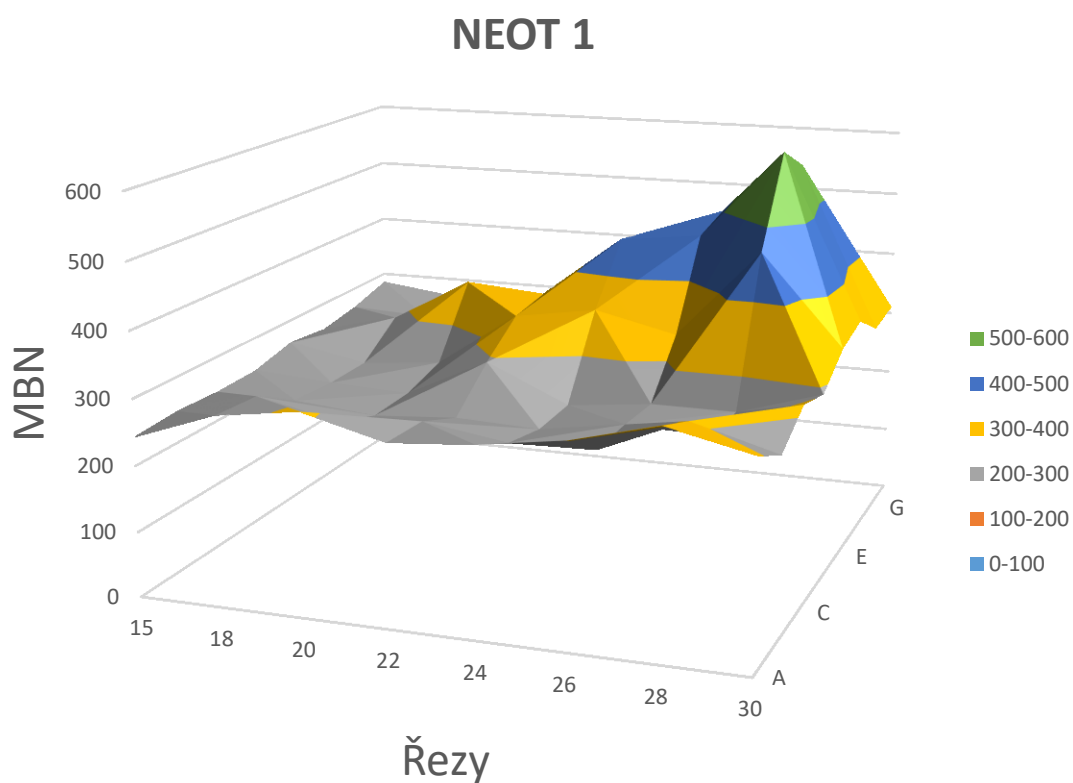
OT 1



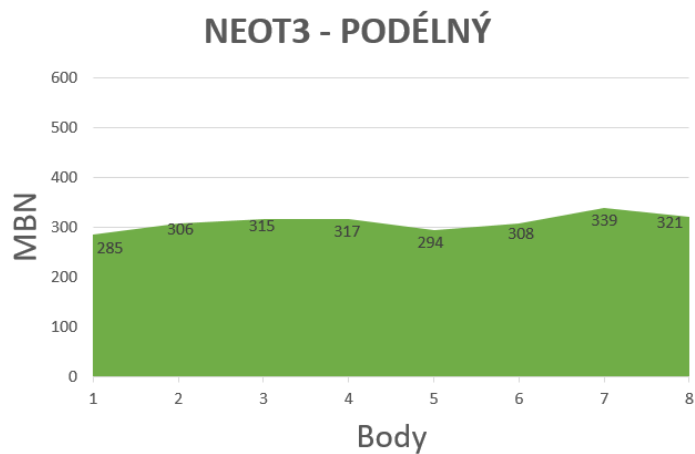
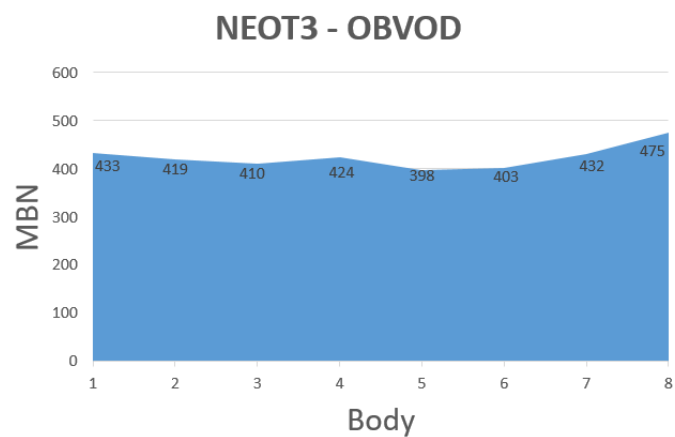
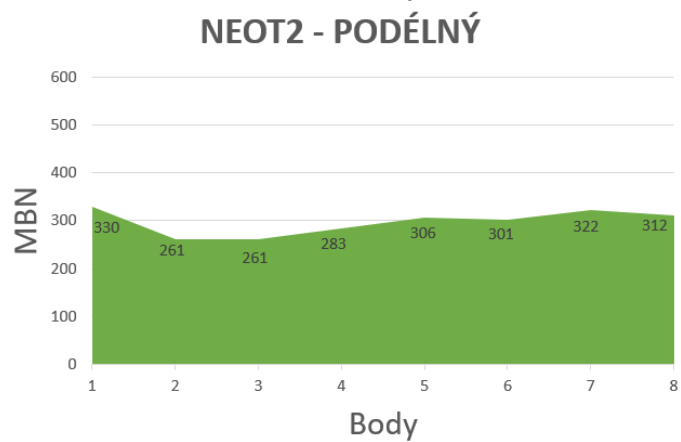
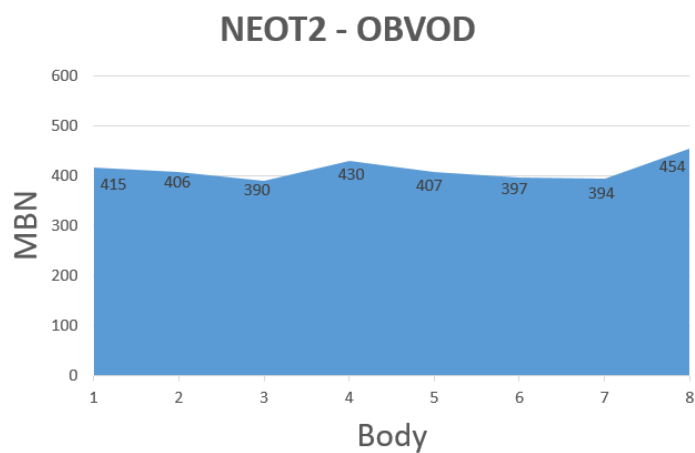
OT 1



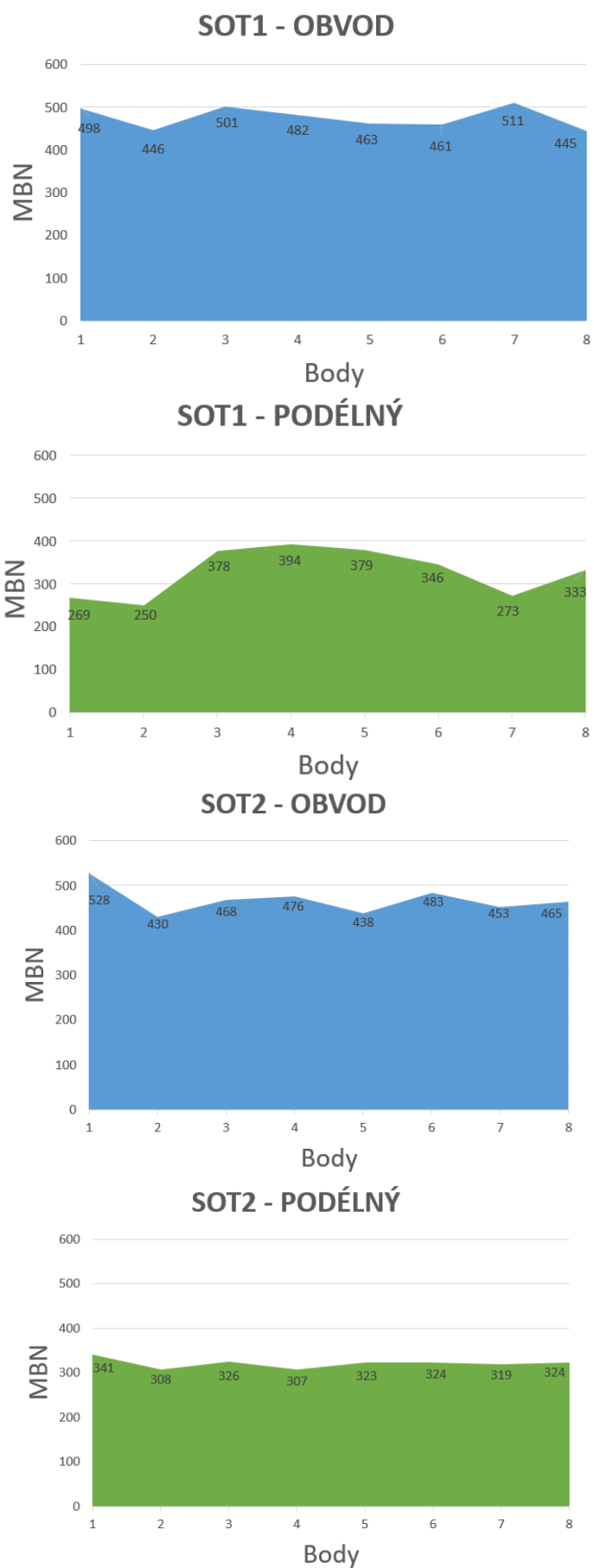
Příloha 15 – Grafické znázornění prvního měření NEOT1



Příloha 16 – Grafické znázornění třetího měření NEOT2,3



Příloha 17 – Grafické znázornění třetího měření SOT1,2



Příloha 18 – Grafické znázornění třetího měření OT2,3

